

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Marko Klinec**

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Mladen Crneković, dipl. ing.

Student:

Marko Klinec

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se dr. sc. Mladenu Crnekoviću na pomoći i savjetima pri izradi rada.

Marko Klinec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARKO KLINEC**

Mat. br.: 0035169474

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PROJEKTIRANJE STOLNE CNC GLODALICE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **DESIGN OF TABLE CNC MILLING MACHINE**

Opis zadatka:

Male stolne glodalice popularni su strojevi hobista na kojima se mogu izraditi mnogi dijelovi. U odnosu na profesionalne strojeve karakterizira ih manja točnost, krutost i brzina, ali i znatno niža ciljena. Osim za potrebe glodanja mogu poslužiti i za bušenje materijala ne tvrdih od aluminija.

U konstrukciji mehaničkog sustava potrebno je koristiti standardne profile, vodilice i prijenosnike gibanja. U konstrukciji energetskog sustava koristiti koračne motore. Za upravljanje strojem odabrati postojeći komercijalni ili besplatni program, te navesti njegove karakteristike, prednosti i nedostatke.

U radu je potrebno:

- definirati mehaničku strukturu glodalice,
- odabrati motore za pojedine pogone, njihove upravljačke sustave i potrebne senzore,
- odabrati ili napisati odgovarajuće programe za upravljanje glodalicom,
- pokazati primjer glodanja jednog uzorka,
- procijeniti vrijednost investicije.

Zadatak zadan:

6. prosinca 2012.

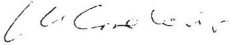
Rok predaje rada:

7. veljače 2013.


Predviđeni datum obrane:

13. - 15. veljače 2013.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Mladen Crneković

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Franjo Čajner



## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA .....	IV
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	V
POPIS OZNAKA .....	VII
SAŽETAK .....	IX
1. UVOD .....	1
1.1. Mogućnosti i primjena stolnih glodalica .....	3
1.2. Komercijalne izvedbe stolnih glodalica na tržištu .....	4
2. MEHANIČKA STRUKTURA STOLNE GLODALICE .....	7
2.1. Glavna i posmična gibanja alatnih strojeva .....	7
2.2. Kuglično navojno vreteno .....	8
2.2.1. Primjer proračuna KNV-a .....	13
2.3. Linearni ležajevi i vodilice .....	18
2.4. Ostali materijal i izvedba konstrukcije .....	20
3. ENERGETSKI DIO STROJA .....	26
3.1. Koračni motori .....	26
3.2. Upravljačka elektronika .....	34
3.3. Napajanje, zaštita paralelnog porta i senzori stroja .....	44
4. PROGRAMSKA PODRŠKA .....	50
4.1. Mach3 .....	50
4.1.1. Početne postavke programa .....	52
4.1.2. Podešavanje motora .....	54
4.1.3. Charge Pump .....	56
4.2. EMC2 i KCam4 .....	57
4.2.1. LinuxCNC ( EMC2 ) .....	57
4.2.2. KCam4 .....	60
5. PRIMJER GLODANJA JEDNOG UZORKA .....	62
6. ZAKLJUČAK .....	71
PRILOZI .....	73
LITERATURA .....	74

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Uloga i mjesto NC tehnologija [1] .....	1
Slika 2.	Ilustracija proizvodnog procesa .....	2
Slika 3.	a), b), c) Primjeri CNC Routera [15], d) izvedba konstrukcije za rezanje žicom [16] .....	4
Slika 4.	Primjeri linearnog vođenja [3] .....	5
Slika 5.	CNC Routeri različitih dimenzija i namjena [16] .....	5
Slika 6.	Primjeri obradnog alata [17],[18] .....	6
Slika 7.	Podjela gibanja kod alatnih strojeva, primjer kod glodanja i tokarenja [1] .....	7
Slika 8.	Crtež prvog kugličnog navojnog vretena [2] i pojednostavljeni prikaz utjecaja trenja .....	8
Slika 9.	Primjer recirkulacije kuglica kod KNV [2], [3] .....	9
Slika 10.	Metode prednaprežanja dvostrukim maticama [2] .....	10
Slika 11.	Metoda povećanja koraka [2] .....	10
Slika 12.	Fiksni i jednostavni oslonac .....	11
Slika 13.	Primjeri montiranja krajeva vretena [3] .....	12
Slika 14.	Primjeri matica i recirkulacije kuglica .....	12
Slika 15.	Primjer glodanja .....	13
Slika 16.	Dijagrami $F-q$ i $n-q$ režima rada stroja .....	14
Slika 17.	Korektivni faktori ovisni o uležištenju .....	16
Slika 18.	Linearni kuglični ležajevi [19] .....	18
Slika 19.	Tandem KLL [20] .....	19
Slika 20.	Profilne linearne vodilice [5] .....	19
Slika 21.	Ostali primjeri linearnog vođenja [19] .....	20
Slika 22.	Precizne linearne vodilice [21] .....	20
Slika 23.	Konstrukcija stroja sa naznačenim materijalom .....	21
Slika 24.	Kućiste za maticu vretena .....	21
Slika 25.	Spojke [22] .....	22
Slika 26.	Spoj motora sa vretenom .....	22
Slika 27.	Primjer uležištenja vretena ( y os ) .....	23
Slika 28.	Stolna CNC glodalica (bez radne ploče) .....	25
Slika 29.	Signali koračnih motora [6] .....	27
Slika 30.	Reprezentativni prikaz momenata koračnog motora [7] .....	27
Slika 31.	Građa koračnih motora: a) PM, b) VR, c) HB [7] .....	29
Slika 32.	Namotaji unipolarnog motora [7],[8] .....	30
Slika 33.	Namotaji bipolarnog motora [7], [8] .....	30
Slika 34.	Reprezentativni krivulja moment – brzina .....	32
Slika 35.	Ovisnost momenta i kuta zakreta osovine motora [9] .....	33
Slika 36.	Uzrok rezonancije (lijevo) i primjer pada momenta pri pojavi [6], [9] .....	34
Slika 37.	Shema spoja elektroničkog upravljanja .....	35
Slika 38.	Blok dijagram L297 .....	36
Slika 39.	L298N blok dijagram .....	40
Slika 40.	Jedan H-most L298N .....	41
Slika 41.	Naponsko dijelilo .....	42
Slika 42.	Električna shema povezivanja L297 sa dva paralelno spojena L298N .....	43
Slika 43.	Dinamika namotaja motora ovisna o naponu [24] .....	45

Slika 44.	Opto – izolator 4N25 (lijevo), komercijalni <i>driver</i> (desno) [14] .....	46
Slika 45.	Optički senzor, Hall – ov senzor i presjek mikroprekidača [23] .....	47
Slika 46.	Shema spoja mikroprekidača (lijevo), referenciranje sa alatom (desno) .....	47
Slika 47.	Smještaj mikroprekidača na stroj (samo limiti) .....	48
Slika 48.	Pojednostavljeni shematski prikaz energetskog dijela stolne glodalice .....	49
Slika 49.	Test kompatibilnosti računala sa <i>Mach3</i> alatom .....	51
Slika 50.	Početni prozor <i>Mach</i> -a i <i>Jog Control</i> prozor .....	52
Slika 51.	Podešavanje paralelnog porta .....	52
Slika 52.	Podešavanje motora u <i>Mach3</i> .....	53
Slika 53.	Definiranje <i>Mach3</i> ulaza .....	54
Slika 54.	Postavke motora .....	55
Slika 55.	Charge Pump [25] .....	57
Slika 56.	Stepper Configuration Wizard [13] .....	58
Slika 57.	Latency test u <i>EMC</i> – u [13] .....	59
Slika 58.	<i>LinuxCNC</i> ( <i>EMC2</i> ) [13] .....	59
Slika 59.	<i>KCam4</i> postavke zadaće pinova paralelnog porta .....	60
Slika 60.	<i>KCam4</i> postavke dinamike motora .....	61
Slika 61.	<i>KCam4</i> početno sučelje .....	61
Slika 62.	Skica i model obratka iz <i>Catie</i> .....	62
Slika 63.	Kreiranje sirovca za model .....	63
Slika 64.	Model opisan sirovcem (lijevo), <i>Part Operation</i> izbornik (desno) .....	63
Slika 65.	Naredba <i>Pocketing</i> .....	64
Slika 66.	Postavke reznog alata (lijevo) i prikaz prozora za simulaciju rada (desno) .....	65
Slika 67.	Putanje reznog alata u <i>Catiji</i> .....	65
Slika 68.	Postavka izlazne datoteke i izbor post – procesora .....	66
Slika 69.	Učitani NC kod u <i>Mach3</i> programu .....	67
Slika 70.	<i>ToolPath</i> i <i>Simulate Program Run</i> u <i>Mach3</i> programu .....	68
Slika 71.	Primjer obratka u <i>EMC2</i> alatu .....	69
Slika 72.	<i>dxf2gcode</i> program .....	70
Slika 73.	<i>Engrave</i> program za generiranje G – koda .....	70

**POPIS TABLICA**

Tabela 1.	Razredi točnosti.....	12
Tabela 2.	Režimi rada stroja.....	13
Tabela 3.	Popis pozicija stroja.....	24
Tabela 4.	Nazivne vrijednosti motora ovisno o spoju .....	31
Tabela 5.	Spajanja namotaja motora.....	31
Tabela 6.	Pinovi i funkcije L297 .....	37
Tabela 7.	Sekvence i izlazni signali kod različitih načina rada motora [10] .....	39
Tabela 8.	Funkcije pinova L298N ( Multiwatt15 kućište ).....	42

## POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE

- 1-00-00    Stolna CNC glodalica
  - 1-01-00    Podsklop X osi
    - 1-01-01        Prednja ploča baze
    - 1-01-02        Stražnja ploča baze
    - 1-01-03        Bočna stranica baze
    - 1-01-04        L nosač za bazu
    - 1-01-05        Osovina za X os
    - 1-01-06        Linearni ležaj SCS20LUU
    - 1-01-07        KNV za X os
    - 1-01-08        Matica za KNV
    - 1-01-09        Kućište za maticu
    - 1-01-10        Horizontalni nosač
  - 1-02-00    Podsklop Y osi
    - 1-02-01        Vertikalni nosač lijevo
    - 1-02-02        Vertikalni nosač desno
    - 1-02-03        L nosač za vertikalu
    - 1-02-04        Spoj vertikalna
    - 1-02-05        Osovina za Y os
    - 1-02-06        Linearni ležaj SCS16LUU
    - 1-02-07        KNV za Y os
    - 1-02-08        Ploča po Y osi
  - 1-03-00    Podsklop Z osi
    - 1-03-01        Osovina za Z os
    - 1-03-02        KNV za Z os
    - 1-03-03        Ploča po Z gore
    - 1-03-04        Ploča po Z dolje
    - 1-03-05        Ploča po Z
  - 1-04-00    Radna ploča
  - 1-05-00    Graničnik za motor
  - 1-06-00    Graničnik za motor - kraći

- 2-00-00   Elektronička shema upravljačke elektronika za koračni motor
  - 2-01-00   Položajni nacrt komponenti
  - 2-02-00   *Top Layer* tiskane pločice
  - 2-03-00   *Bottom Layer* tiskane pločice
- 3-00-00   Breakout Board za stolnu CNC glodalicu
  - 3-01-00   Položajni nacrt komponenti
  - 3-02-00   *Top Layer* tiskane pločice
  - 3-03-00   *Bottom Layer* tiskane pločice

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$C_a$	[N]	dinamička nosivost
$C_{oa}$	[N]	statička nosivost
$d_o$	[mm]	nazivni promjer vretena
$\eta_t$		teorijska efikasnost
$\eta$		efikasnost
$F$	[N]	sila
$F_m$	[N]	prosječna sila
$F_{izv,t}$	[N]	teoretska sila izvijanja
$F_{izv}$	[N]	sila izvijanja
$F_{pred}$	[N]	sila prednaprezanja
$f_{n,kr}$		korektivni faktor uležištenja
$f_{Fc}$		korektivni faktor ležajeva
$I$	[A]	struja
$K$	[N/m]	krutost
$KPMM$		broj impulsa za pomak matice 1mm
$L$	[okretaj]	životni vijek
$L_{izr}$	[okretaj]	proračunati životni vijek
$L_h$	[h]	životni vijek u satima
$L_{h,izr}$	[h]	izračunat životni vijek u satima
$l$	[mm]	radni hod matice
$l_{kr}$	[mm]	kritični radni hod matice
$M$	[Nm]	moment
$M_d$	[Nm]	moment držanja kod koračnog motora
$m$	[kg]	masa
$\mu$		faktor trenja
$n$	[min <sup>-1</sup> ]	broj okretaja u minuti
$n_{mat}$		broj punih krugova kanala kuglica u matici
$n_{kr}$	[min <sup>-1</sup> ]	kritična brzina vrtnje
$n_{dop}$	[min <sup>-1</sup> ]	dopuštena brzina vrtnje
$n_m$	[min <sup>-1</sup> ]	prosječna brzina vrtnje
$P$	[mm]	korak vretena
$P_M$		broj koraka motora za puni okret
$p_M$	[°]	kut jednog koraka motora
$P_{MHS}$		broj impulsa u modu polu - korak

$R$	$[\Omega]$	otpor
$\theta$	$[\text{rad}]$	kut zakreta
$U$	$[\text{V}]$	napon

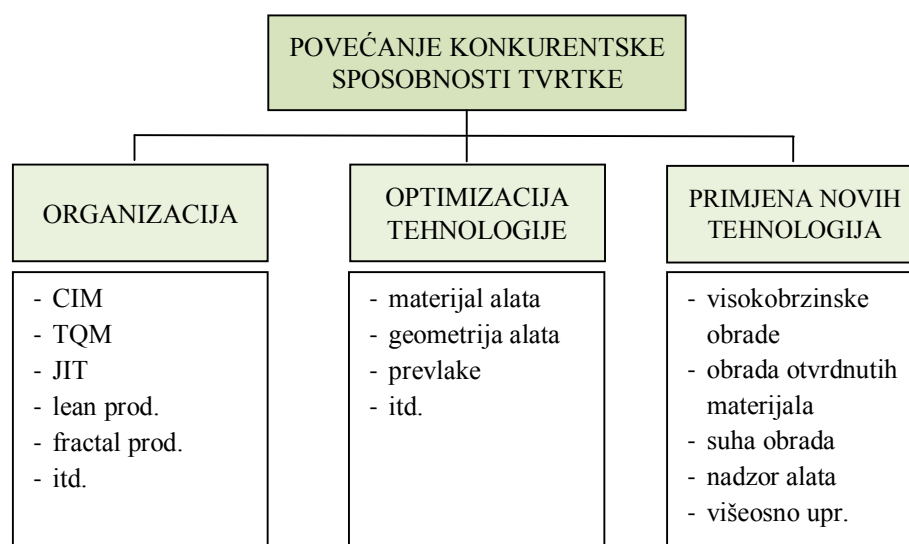


## SAŽETAK

U radu je prezentirana izvedba stolne CNC glodalice. Pokrivena su sva područja kod izrade jednog ovakvog stroja, od jednostavne mehaničke konstrukcije preko elektronike i motora do programskog upravljanja. Ovakvi strojevi su postali financijski vrlo dostupni a njihova višestruka namjena samo pridonosi tome. Verzija stroja koja je opisana u ovom radu pripada donjem razredu gledajući njegove mogućnosti ali to nipošto ne umanjuje njegovu funkcionalnost. Upravljanje troosnog stroja će se vršiti stolnim računalom, preko paralelnog porta i već postojećih programskih rješenja koji će se također opisati. Kao izvršni elementi koriste se 3 koračna motora za koje je projektirana upravljačka elektronika ( eng. *Stepper Motor Drivers* ). Postoje komercijalne izvedbe ovakvog projekta na tržištu prema kojima će se stroj opisan u ovom radu uspoređivati. Na kraju rada iznijet će se zaključak koji opravdava ili ne opravdava financijsku i funkcijsku isplativost ovakvih strojeva.

## 1. UVOD

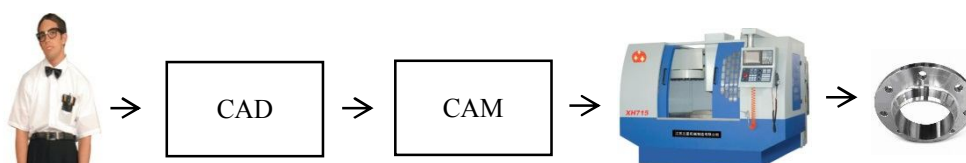
Dinamika kojom su se numerički upravljani ( eng. *Numerical Control*, NC ) strojevi implementirali u današnju industriju nije zaprepastila. Pojavom prvih takvih strojeva u Americi ( *US Air Force*) postalo je jasno da zadaci namijenjeni za ovu vrstu strojeva nadilaze mogućnosti klasičnih alatnih strojeva koji su do tada prevladavali na tržištu. Kod tih klasičnih strojeva funkcija upravljanja pada na čovjeka. Sve veći zahtjevi na dosljednost tolerancija, složena geometrija i povećanje produktivnosti ubrzo nisu ostavili puno prostora za alternativu pa numerički upravljani strojevi preplavljaju industriju, posebno kada upravljačku funkciju preuzima računalo – CNC ( eng. *Computer Numerical Control* ).



Slika 1. Uloga i mjesto NC tehnologija [1]

Kada se govori o stolnim glodalicama, ili CNC *Routerima* u engleskoj literaturi, uglavnom se misli na 3-osne ili 5-osne računalom kontrolirane strojeve čija primjena je zaista široka. Izvedbe samih strojeva su također široke i prilagođavaju se zadaćama stroja. Upravo zbog lake dostupnosti elemenata za gradnju, kao i transparentne programske podrške, gradnja ovih strojeva vrlo je popularna kod hobista što je i pridonijelo tako velikoj rasprostranjenosti. Ozbiljnije i robusnije varijante ovih strojeva mogu se naći u industriji gdje obavljaju zadaće glodanja, graviranja, itd., u dvije ili čak tri smjene. Stroj opisan u radu nije predviđen za rad u takvim okolinama i uvjetima ali ima puno dodirnih točaka sa njima. Namijenjen je za glodanje i graviranje drva i lakih metala, ima 3 osi koje će biti upravljane preko koračnih motora. U radu će se opisati mehanička konstrukcija, elektronika sa aktuatorima te programska podrška. Opisat će se glavni elementi iz tih kategorija i njihove

funkcije te će se oni uspoređivati sa gotovim rješenjima koje se nude natržištu. Tako će prvi dio rada biti posvećen mehaničkoj konstrukciji tj., kugličnim navojnim vretenima, linearnim ležajevima te općenito o korištenom materijalu i komponentama. Drugi dio govorit će o osnovama koračnih motora i njihovim pripadajućim elektroničkim sklopovima za povezivanje sa računalom. U posljednjem dijelu će se govoriti o programskoj podršci, alatima koji PC pretvaraju u CNC kontroler. Projekt je rađen u *Catiji* koja se može koristiti i kao generator G-koda za CNC jer se programiranje CNC strojeva neće obraditi u radu. Projektiranje i dizajn elektroničkih pločica ( eng. *Printed Circuit Board, PCB* ) će se raditi u *Altium Designeru*. Svi CAD/CAM alati koji su danas toliko ubrzali i pojednostavili procese proizvodnje u isto vrijeme zahtijevaju puno znanja kako bi konačan proizvod imao željene karakteristike. Integracija visokosofisticiranih programa iziskuje iskustvo inženjera gdje se najprije razvijaju prototipovi proizvoda te se proizvod sa vremenom optimizira do konačne verzije.



Slika 2. Ilustracija proizvodnog procesa

Cijeli projekt obuhvaća vještine i znanja iz strojarstva, elektronike i računalstva te je kao takav idealan za mehatroničare. Težina je ipak malo više stavljena na elektronički dio i programsku podršku iako su detaljno opisane i glavne mehaničke komponente i konstrukcija stroja. Kod izgradnje stroja veliki faktor bile su financije jer će izgrađeni stroj na tržištu prije konkurirati financijski negoli funkcijama i performansama. Neki dijelovi, posebno u konstrukciji stroja, imaju značajnih nedostataka koji su svjesno načinjeni radi pojednostavljenja i bržeg završavanja projekta. U zaključku se ti nedostaci rezimiraju i donosi se sud je li bilo ispravno što su bile načinjene.

Sve komponente i dijelovi korišteni u radu mogu se kupiti u Hrvatskoj. Malo je izazovnije ako se želi samostalno napraviti financijski isplativ stroj za hobi. Ima puno distributera koji prodaju specijaliziranu opremu namijenjenu za CNC *Routere* i nekolicina tvrtki koje rade takve strojeve po narudžbama. Svi oni svjedoče kako su ovi strojevi vrlo popularni i nalaze primjenu i u Hrvatskoj.

### 1.1. Mogućnosti i primjena stolnih glodalica

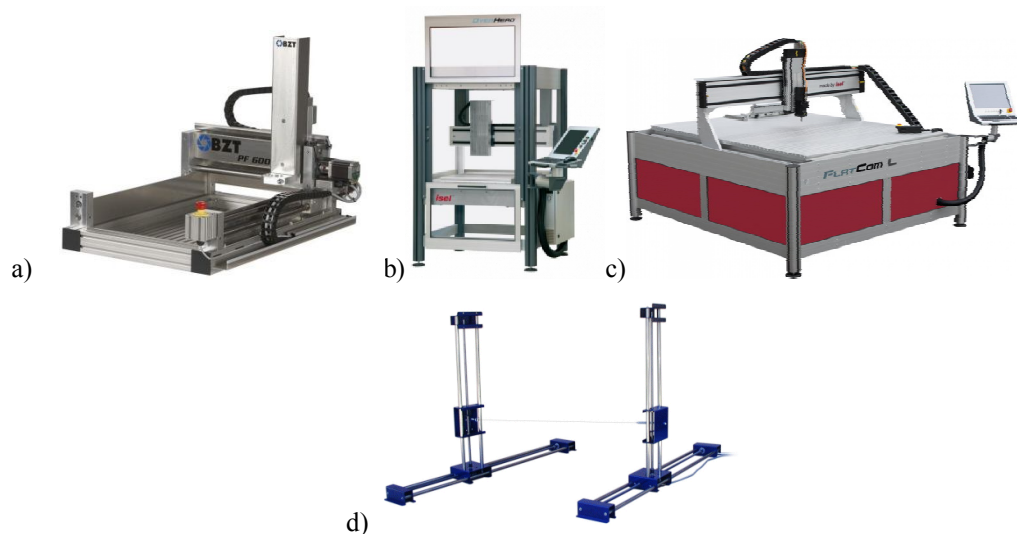
Od prvih NC ( eng. *Numerical Control* ) strojeva, čiji počeci su bili nešto prije pedesetih godina prošlog stoljeća, do današnjim modernih višeosnih CNC obradnih centara, potencijali za primjenom nikad nisu bili upitni te su stoga u relativno kratkom razdoblju napravljeni veliki pomaci u tom dijelu industrije. Razlika između CNC *Routera* i CNC obradnih centara je ogromna. Obradni centri su industrijski usmjereni proizvodi koji rade velike serije proizvoda, imaju automatiziranu izmjenu alata za obradu, puno veće preciznosti, veće dimenzije obrade, brže obrade, itd.. Ukratko, obradni centri i *routeri* imaju malo zajedničkih karakteristika osim što su oboje upravljani računalom.

CNC *Routeri* se često rade po narudžbama jer će obavljati specifičnu zadaću. Stroj, primjerice, može biti predviđen za obradu drva, metala ili kompozitnih materijala. Same konstrukcije se ne razlikuju koliko pogonski dio. Za ozbiljnije obrade potrebni su jači motori i obradna glava, što iziskuje adekvatnu elektroniku.

Glavne zadaće za koje se koriste CNC *Routeri* mogu se svrstati u sljedeće kategorije:

- glodanje/graviranje/rezbanje,
- bušenje,
- lasersko/plazma rezanje,
- pozicioniranje, mjerenje.

Gore su spomenuti materijali koji se mogu obrađivati. Najviše su to drvo i aluminij iako prednosti ovih strojeva sve više uviđaju modelari i maketari pa su danas popularne obrade plastike. Rezanje ekspandiranog polistirena, tj. stiropora, reže se vrućom žicom i zahtijeva paralelnu  $x$  ili  $y$  os kod konstrukcije CNC *Routera* i daje odlične rezultate [Slika 3]. Ovisno za što je stroj predviđen njegova konstrukcija se tome prilagođava. Ako će se koristiti za graviranje postoji mogućnost obrade većih komada čije pozicioniranje može biti problematično. Zato se često konstruiraju strojevi koji imaju kućište na visokim „nogama“ da bi se obradak mogao pozicionirati odozdo što je također praktično kod laserskog graviranja.



Slika 3. a), b), c) Primjeri CNC Routera [15], d) izvedba konstrukcije za rezanje žicom[16]

## 1.2. Komercijalne izvedbe stolnih glodalica na tržištu

Kao što je ranije napomenuto, postoji puno varijacija ovakvih strojeva na tržištu. Selekcija se može napraviti prema radnim dimenzijama i vrsti obrade. To su dva najvažnija faktora o kojima ovisi cijena stroja. Predviđene radne dimenzije stroja koji će se opisati u radu su 700x500mm pa će se u ovom odjeljku staviti naglasak na takve strojeve.

O dimenzijama stroja ovisi pogon. Za manje CNC *Routere* gotovo uvijek se koriste koračni motori. Razlog je cijena, jednostavna implementacija i relativno dobra programska podrška. Postoji tek nekolicina njih bazirana na servomotorima i takvi se strojevi koriste za teže i zahtjevnije poslove. U bliskoj budućnosti i daljnjim padom njihove cijene postoji realna opcija masovnijeg korištenja servomotora. Mehaničke komponente u pravilu nisu drugačije ovisno o dimenzijama i namijeni stroja. Glavni dijelovi, kuglična navojna vretena, linearni ležajevi, vodilice te spojke nalaze se u svakom CNC *Routeru*. Kod hobista se često zbog financija pribjegava metričkim navojnim šipkama ili trapeznim navojnim vretenima za pretvaranje linearnog gibanja u translacijsko. Takva rješenja ne mogu dati zadovoljavajuće tolerancije prilikom obrade kao kuglična navojna vretena pa se zato izbjegavaju. Pri većim strojevima za oslonac se koriste linearne profilne vodilice sa odgovarajućim ležajevima, tzv. „vagončićima“ u žargonu [Slika 4]. Alternativa je upotreba klasičnih osovine kružnog presjeka sa klasičnim linearnim ležajevima [Slika 4]. Osovine za razliku od linearnih vodilica mogu podnijeti značajno manju nosivost ali se unatoč tome često koriste kod manjih CNC *Routera* dok kod profesionalnih CNC strojeva i obradnih centara profilne vodilice nemaju

alternativu. Treća opcija za translacijsko gibanje su V-tip ležajevi koji se kotrljaju po vodilici. Prednost su im laka montaža i održavanje te niža cijena u odnosu na prethodna rješenja. Ove dvije komponente, vretena i vodilice, nude određenu slobodu kod projektiranja stroja.

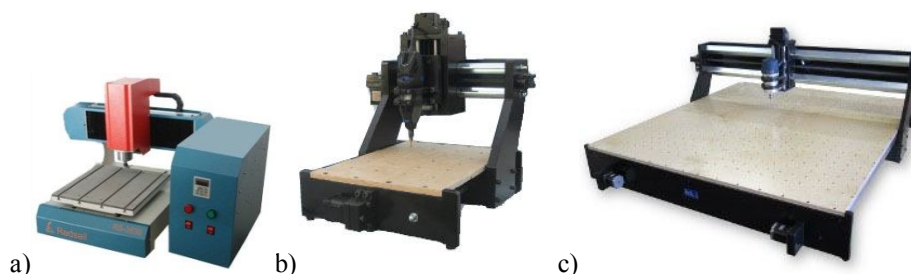


**Slika 4. Primjeri linearnog vođenja [3]**

Gruba podjela CNC Routera prema radnim dimenzijama mogla bi se svesti na:

- mali CNC Routeri: radne dimenzije manje do 400x400mm,
- srednji CNC Routeri: radne dimenzije do 1200x1200mm,
- veliki CNC Routeri: radne dimenzije i do 2000x3000mm

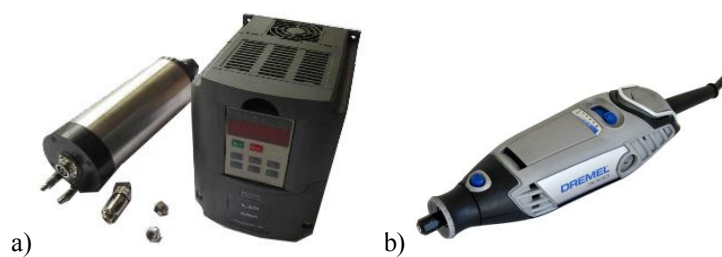
Mali Routeri najveću primjenu imaju kod izrade električnih tiskanih pločica (eng. *Printed Circuit Boards*, PCB) gdje se koriste za bušenje rupa i glodanje izvoda. Specifično kod njih je što imaju pomičnu radnu ploču a ne pomični „most“ kao većina takvih strojeva. Upravo zbog toga su im ograničene radne dimenzije [Slika 5a]. Routeri srednjih dimenzija najčešće obavljaju zadaće glodanja drva ili lakih metala. Često su to dekorativni drveni ili aluminijski obratci na koje se graviraju natpisi. Takvi su strojevi najrasprostranjeniji na tržištu jer nude puno mogućnosti za nadograđivanje, financijski su dostupni i laki su za upravljanje [Slika 5b]. Strojevi većih dimenzija imaju primarnu zadaću rezanja i glodanja, prvenstveno drva. Popularni su kod obrtnika koji se bave drvnom industrijom, izradom namještaja i drugih vezanih područja [Slika 5c].



**Slika 5. CNC Routeri različitih dimenzija i namjena [16]**

Routeri se na tržištu mogu kupovati po dijelovima. Može se kupiti gotovo kućište sa svim mehaničkim komponentama bez elektronike, kućište s elektronikom ali bez obradne glave ili kompletni stroj sa mehanikom, elektronikom i obradnom glavom. Obradne glave s

frekvencijskom kontrolom ( eng. *Variable Frequency Drive*, VFD ) su najpouzdanije rješenje [Slika 6a]. Konstantni moment kod obrade omogućuju ozbiljnije zahvate i glodanje tvrdih materijala. Mogu se upotrijebiti električni višenamjenski alati ( poznatiji kao „dremel“ ili „bijaks“ ) koji imaju broj okretaja i preko  $30000\text{min}^{-1}$  [Slika 6b]. Njihova upotreba nema nikakvih prednosti nad gore spomenutom izvedbom osim naravno financijskih. Kod tvrdog materijala ili brzih posmaka može doći do oštećenja ležajeva i samog alata. Obradne VFD glave su u literaturi poznatije kao *Spindle Head* dok se ove obične koristi termin *Router Head*.



Slika 6. Primjeri obradnog alata [17],[18]

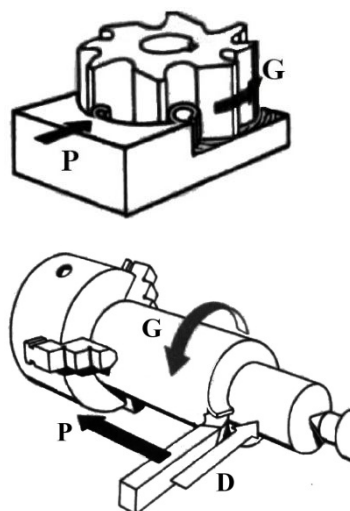
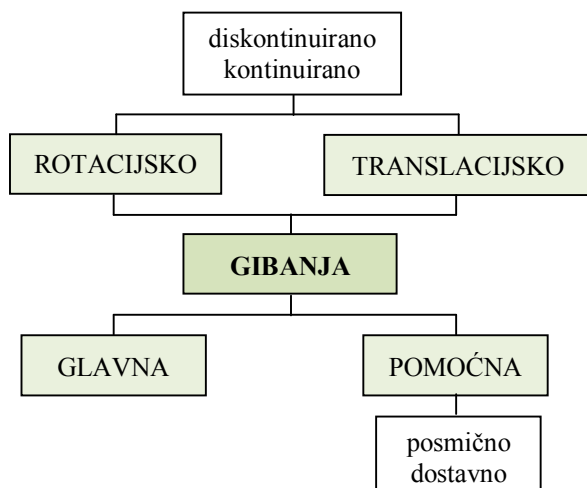
## 2. MEHANIČKA STRUKTURA STOLNE GLODALICE

### 2.1. Glavna i posmična gibanja alatnih strojeva

Glavna zadaća *Routera* je dakle glodanje. Glodanje je postupak obrade odvajanjem čestica na obratcima različitih oblika i materijala. Postupak glodanja se može podijeliti prema više kriterija:

- prema proizvedenoj kvaliteti obrađene površine: *grubo, završno, fino*
- prema kinematici postupka: *protusmjerno, istosmjerno*
- prema položaju reznih oštrica na glodalu: *obodno, čeono*
- prema obliku obrađene površine: *ravno, okretno, profilno, odvalno, oblikovno*

Glavno gibanje kod ove obrade je pretežno kružno, najčešće pridruženo alatu. Osim glavnog gibanja, tu su pomoćna gibanja koja se dijele na posmična i dostavna. Posmična i dostavna gibanja su u pravilu pravocrtna a zadaća im je omogućiti kontinuiranost obrade. Podjela gibanja ( glavno, posmično i dostavno ) je ujedno i podjela pogona pa tako imamo istoimene nazive za pogone.



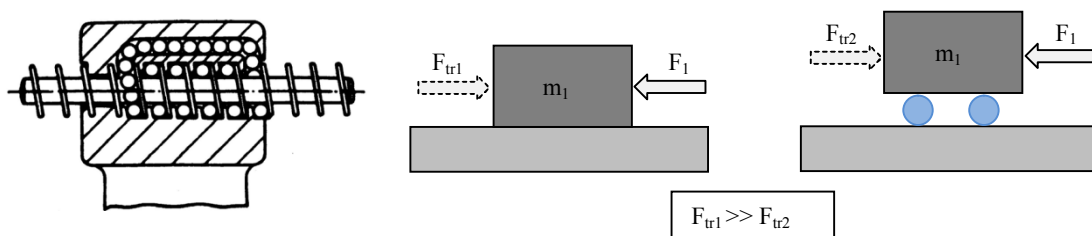
Slika 7. Podjela gibanja kod alatnih strojeva, primjer kod glodanja i tokarenja [1]

CNC *Routeri*, ovisno o izvedbi konstrukcije i pogona, mogu zadovoljiti sve gore navedene kriterije kod glodanja. Jedino ograničenje se javlja zbog broja stupnja slobode ( troosne glodalice ) gdje se ne mogu obrađivati složene geometrije.



## 2.2. Kuglično navojno vreteno

Kuglično navojno vreteno ( KNV ) se može definirati kao mehanički aktuator koji rotacijsko gibanje pretvara u linearno i obratno ( linearno u rotacijsko ). Postoje zapisi i literature koje pokazuju da su već u 19.st. bili prvi pokušaji zamjene trenja klizanjem sa trenjem kotrljanja u smislu umetanja malih kuglica između podloge vijka i matice<sup>1</sup>. Naravno da zbog tehnologije u ono vrijeme to nije bilo moguće provesti u praksu pa se prva konkretna primjena kugličnih navojnih vretena u industriji smatra njihova upotreba kod upravljanja automobilom ( eng. *Steering gear* ) od strane *General Motorsa* 1940-ih. Ubrzo su se uvidjele mogućnosti upotrebe te se proizvodnja i implementacija raširila svijetom. Danas je jedan ozbiljan NC stroj nezamisliv bez kugličnih navojnih vretena iako su se javile alternative.



Slika 8. Crtež prvog kugličnog navojnog vretena [2] i pojednostavljeni prikaz utjecaja trenja

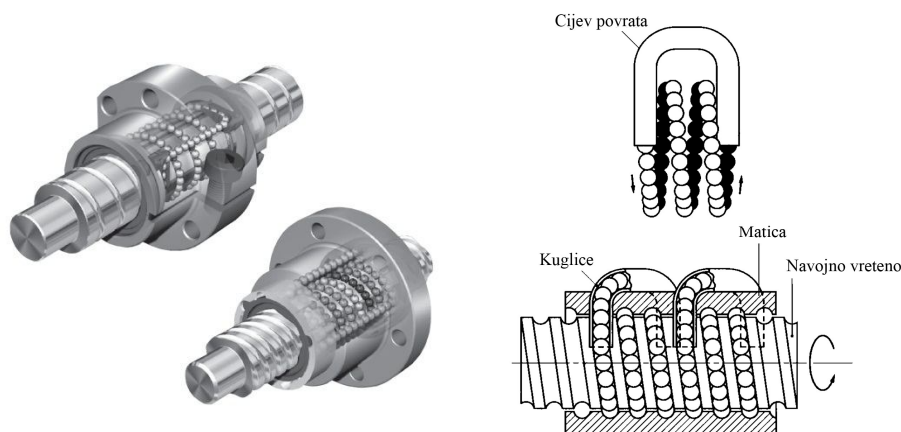
Mehanička efikasnost KNV-a naspram metričkih navojnih šipki je preko 90%, a u usporedbi sa trapeznim navojnim vretenima preko 50%. Glavne prednosti, upravo zbog smanjena trenja, su im:

- točnost pozicioniranja ( nema praznog hoda ),
- jednakomjerno gibanje kod većih masa/sila,
- zahtijevaju pogone manjih snaga,
- tihi rad,
- smanjeno trošenje koje za posljedicu ima veći životni vijek,
- manja vremena zastoja zbog potreba održavanja

Kao nedostatak bi se mogla navesti cijena u usporedbi sa trapeznim vretenima. Trapezna vretena uz pravilan proračun mogu biti samokočna dok kod KNV motori imaju funkciju kočnice ako je ona potrebna jer su sile trenja premale ( izraženo kod vertikalno postavljenih vretena ). Glavna karakteristika KNV-a je recirkulacija kuglica u matici [Slika 9]. Ima različitih konstrukcijskih izvedbi kako postići recirkulaciju ( proizvođači

<sup>1</sup> The Practical Engineering - Introduction of ball screw, R.K. Allan

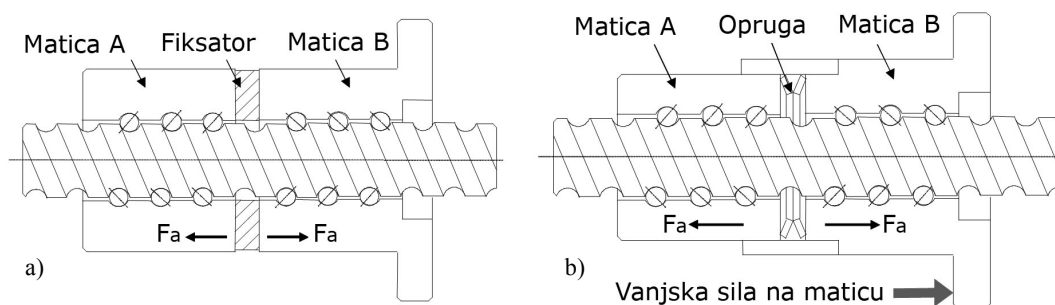
uvijek nude različite vrste ovisno o dimenziji vretena i kuglica, tj. ovisno o namjeni ) ali funkcija im je ista – ovim sistemom se osigurava da rotacijom vretena kuglice u matici uvijek imaju dodir sa vretenom i tako osiguravaju jednakomjerno linearno gibanje bez ispadanja kuglica van sklopa.



Slika 9. Primjer recirkulacije kuglica kod KNV [2], [3]

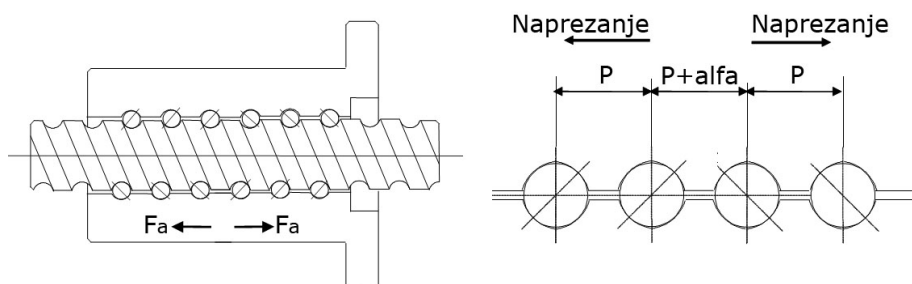
KNV se u pravilu kod naručivanja uzima u paru tj., kuglično navojno vreteno i odgovarajuća matica. Postupak montiranja matice na kuglično navojno vreteno uz adekvatan alat nije kompliciran postupak ali čak i mala nepažnja može za posljedicu imati ispadanje kuglica iz matice ( kod većine matice one se ne mogu vratiti ). Kod KNV-a je postizanje predopterećenja ( eng. *preload* ) između matice i vretena jedna od bitnijih značajki koje proizvođači, kao i korisnici, žele postići. Predopterećenjem se stvaraju plastične deformacije između kuglica matice i navoja na vretenu te se time eliminira aksijalna zračnost između njih, povećava se krutost sklopa i eliminiraju se plastične deformacije koje bi se javile kasnije kod većih opterećenja pri radu. Predopterećenje se postiže jednom od četiri metode:

- **Metoda dvostruke matice:** između dviju matice se postavlja fiksator, tzv. *spacer*, čija debljina je ekvivalent deformaciji koja se javlja pri opterećenju. Fiksator može biti uži od razmaka između matice te ih tako privlačiti ( kompresijska metoda - rijetko se koristi ). Metoda dvostruke matice omogućuje velika predopterećenja [Slika 10a].
- **Metoda dvostruke matice s oprugom:** metoda slična gornjoj samo je umjesto fiksatora između matice smještena opruga. Opruga sa svojim svojstvom prigušivanja apsorbira sve devijacije koje se javljaju zbog različitih dimenzija kuglica, nesavršenosti navoja, nečistoća, itd.. Nedostatak ove metode je što se KNV može koristiti samo kad vanjsko opterećenje djeluje u jednom smjeru [Slika 10b].



Slika 10. Metode prednaprezanja dvostrukim maticama [2]

- **Metoda povećanja koraka navoja:** metoda, po funkciji, također slična prvoj ali se koristi jedna matica. Prednaprezanje se postiže tako da se između recirkulacijskih krugova ( u sredini matice ) poveća korak između susjednih kuglica. Jeftina metoda koja je ograničena veličinom same matice [Slika 11].



Slika 11. Metoda povećanja koraka [2]

- **Metoda predimenzioniranja kuglica:** prednaprezanje se postiže većim kuglicama u matici koje su u stalnom kontaktu sa vretenom i maticom u 4 točke. Metoda omogućuje male, kompaktne matice ali male sile prednaprezanja.

Pri izboru KNV-a za određenu aplikaciju najvažnije je poznavati karakteristike sustava u koji će se implementirati i uvjete rada. Pet karakteristika se može izdvojiti koje korisnik treba poznavati za proračun i izbor vretena:

- teret koji će vreteno nositi,
- brzina vrtnje,
- duljina hoda matice,
- željeni razred točnosti ( C0 do Ct10 ) [Tabela 1],
- željeni životni vijek

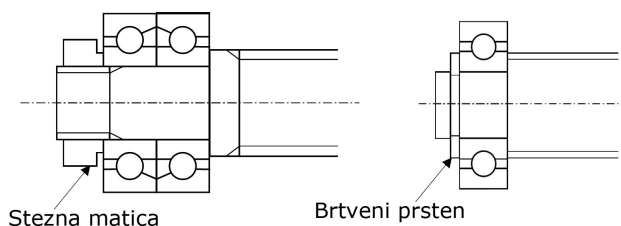
Podaci koje proizvođači redovito daju uz KNV su:

- dinamička nosivost ( $C_a, N$ ),

- statička nosivost ( $C_{oa}$ ,  $N$ ),
- aksijalna krutost ( $K$ ,  $N/m$ ),
- broj krugova kuglica u matici ( $n_{mat}$ ),
- općenite dimenzije ( promjer, korak, itd. )

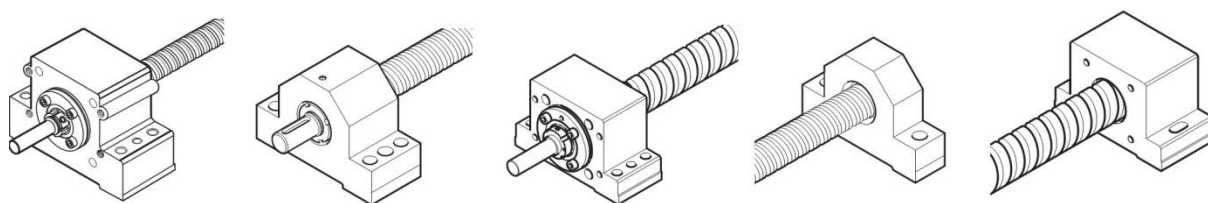
Dinamička nosivost je definirana kao nosivost pod kojom će 90% potpuno identičnih kuglica u matici, pod identičnim uvjetima, postići milijun rotacija bez javljanja greške u radu. Statička nosivost je aksijalno opterećenje u mirovanju koje uzrokuje deformaciju ( suma svih deformacija ) na kuglicama ili površinama na kojima se kotrljaju za 0.01% veću od promjera samih kuglica u vretenu. Kod naručivanja KNV-a uvijek se nude opcije završetaka vretena jer se često pri samostalnoj obradi krajeva podcijeni žilavost materijala što dovodi do oštećenja. Također se nude odgovarajuća uležištenja za krajeve vretena što je od iznimne važnosti. Neprecizno montiranje vretena dovodi do njegovog kraćeg životnog vijeka, vibracija, buke, zapinjanju pri gibanju, nepreciznom pozicioniranju, lomu završetaka vretena , itd.. Montaža krajeva vretena može se izvesti na tri načina:

- **Fiksni oslonac:** kad je potrebna velika aksijalna krutost, nosivost i brzine obrade. Izvodi se u obliku dvorednih kugličnih ležajeva sa kosim dodirom [Slika 12].
- **Jednostavni oslonac:** jeftinija opcija sa jednorednim kugličnim ležajevima gdje nema tako visokih zahtjeva tokom operacije [Slika 12].
- **Slobodni oslonac:** kada se ne javljaju problemi sa vibracijama i kritičnim brzinama. Većinom kod vretena gdje je mali omjer između promjera i duljine vretena a radi se o malim brzinama vrtnje.



Slika 12. Fiksni (lijevo) i jednostavni (desno) oslonac

U praksi se često jedan kraj vretena montira kao fiksni a drugi kao jednostavan oslonac. Ležajevi se mogu montirati izravno u kućište stroja ( većinom kod CNC Routera ) ili se mogu staviti u kućište koje se zatim montira na predviđeni dio stroja [Slika 13].



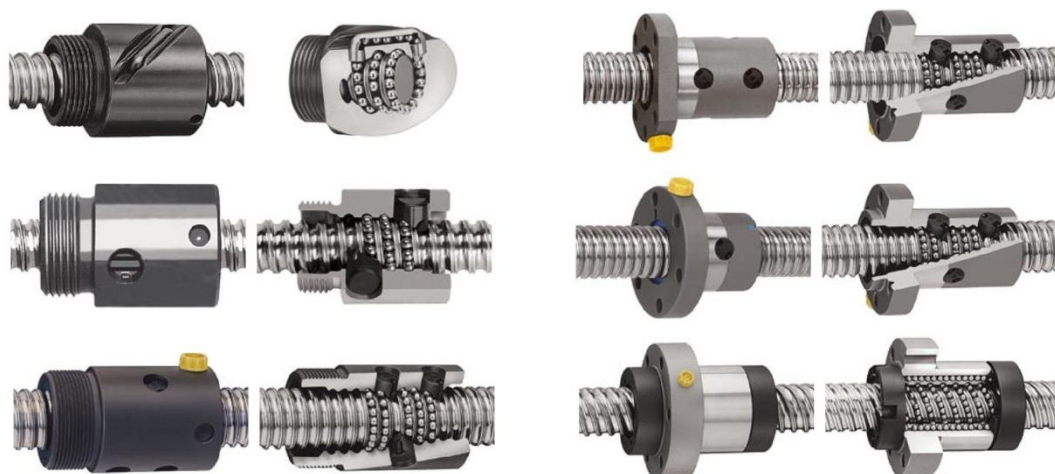
Slika 13. Primjeri montiranja krajeva vretena [3]

Razredi točnosti koji se spominju u tekstu odnose se na grešku koraka navoja ( eng. *Lead Error* ). Greška koraka je točnost pozicioniranja matice ( udaljenost ) nakon jednog okretaja vretena.

Tabela 1. Razredi točnosti

	POZICINIRANJE				TRANSPORT		
Razred točnosti	C0	C1	C2	C3	C5	Ct7	Ct10
$V_{300}^2$	3.5μm	5μm	7μm	8μm	18μm	52μm	210μm

Na donjoj slici [Slika 14] prikazane su modifikacije kugličnih matica a ranije je spomenuta podjela prema vrsti prednaprezanja. Za povezivanja KNV-a sa ostalim dijelovima stroja potrebno je kupiti ili izraditi kućište koje nasjeda na maticu.

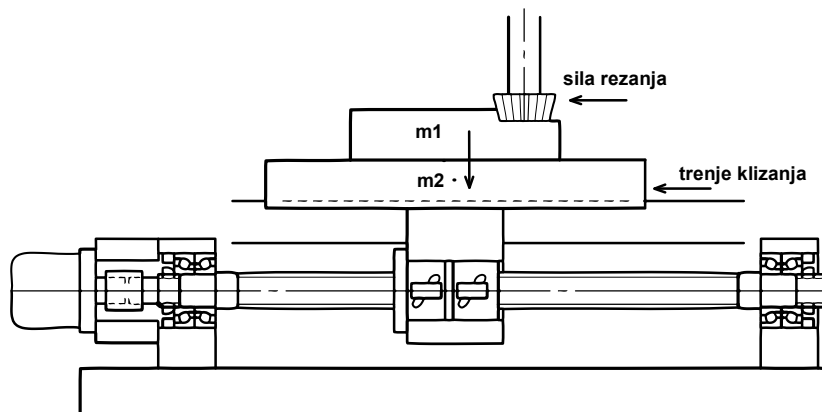


Slika 14. Primjeri matica i recirkulacije kuglica

<sup>2</sup> Najveća varijacija greške koraka 300mm unutar efektivnog hoda.

### 2.2.1. Primjer proračuna KNV-a

U ovom odjeljku biti će prikazan pojednostavljeni proračun za izbor vretena. Koristit će se iskustveni podaci<sup>3</sup> aksijalnih sila i pretpostavit će se budući režim rada stroja. Proračun će biti prezentiran za  $x$ -os koja trpi najveća opterećenja [Slika 15].



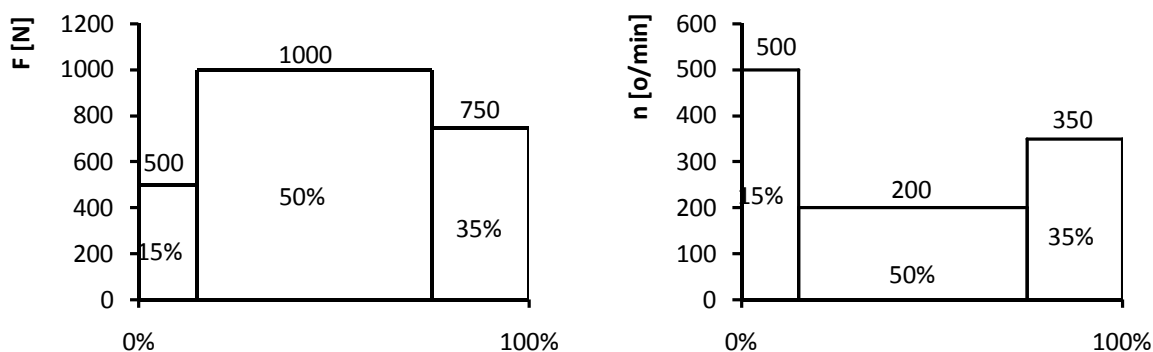
Slika 15. Primjer glodanja

U tablici [Tabela 2] su prikazana tri režima rada sa odgovarajućim brzinama i silama. Prvi režim je pozicioniranje ili brzi hod. To su dostavna gibanja stroja koja zahtijevaju veliku brzinu i nisu pod utjecajem velikih aksijalnih sila. Drugi režim, gruba obrada, troši najviše vremena stroja gdje se ujedno javljaju i najveća opterećenja na vreteno i pogon. Fina obrada je treći režim rada stroja gdje je omjer brzina i sila smješten negdje u sredini dva prije spomenuta režima rada. Uvjeti koji su još bitni za proračun je broj radnih sati stroja ( $L_{h, stroj}=20000h$ ) od kojih se uzima postotak rada vretena ( $t_{vret}=60\%$ ).

Tabela 2. Režimi rada stroja

	q	n [ $\text{min}^{-1}$ ]	F [N]
<b>Brzi hod</b>	15%	500	500
<b>Gruba obrada</b>	50%	200	1000
<b>Fina obrada</b>	35%	350	750
<b>Životni vijek stroja</b>	$L_{h, stroj}=20000h$		
<b>Rad vretena u <math>L_{h, stroj}</math></b>	$t_{vret}=60\%$		

<sup>3</sup> Mareković, M.: *Diplomski rad*, Hoffman, P.J., Hopewell, E.S., Janes, B., Sharp K.M.: *Precision Machining Technology*

Slika 16. Dijagrami  $F$ - $q$  i  $n$ - $q$  režima rada stroja

Prosječna brzina rada stroja:

$$n_m = \frac{n_1 \cdot q_1 + n_2 \cdot q_2 + n_3 \cdot q_3}{100\%} = \frac{500 \cdot 15 + 200 \cdot 50 + 350 \cdot 35}{100} \quad (1)$$

$$n_m = 297.5 \text{ min}^{-1} \approx 297 \text{ min}^{-1}$$

Prosječno opterećenje tokom rada:

$$F_m = \sqrt[3]{F_1^3 \cdot \frac{n_1}{n_m} \cdot \frac{q_1}{100} + F_2^3 \cdot \frac{n_2}{n_m} \cdot \frac{q_2}{100} + F_3^3 \cdot \frac{n_3}{n_m} \cdot \frac{q_3}{100}} \quad (2)$$

$$F_m = \sqrt[3]{500^3 \cdot \frac{500}{297} \cdot \frac{15}{100} + 1000^3 \cdot \frac{200}{297} \cdot \frac{50}{100} + 750^3 \cdot \frac{350}{297} \cdot \frac{35}{100}}$$

$$F_m = 815.46 \text{ N} \approx 816 \text{ N}$$

Životni vijek vretena:

$$L_{h,izr} = L_{h,stroj} \cdot \frac{t_{vret}}{t_{stroj}} = 20000 \cdot \frac{60}{100}, \quad (3)$$

$$L_{h,izr} = 12000 \text{ h}$$

$$L_{izr} = L_h \cdot n_m \cdot 60 = 12000 \cdot 297 \cdot 60 = 213\,840\,000 \quad (4)$$

$$L_{izr} = 213.84 \cdot 10^6 \text{ okretaja}$$

Preko dobivenog životnog vijeka vretena (2) i prosječne sile (4), izračunavamo dinamičku nosivost vretena prema kojoj kasnije izabiremo vreteno iz kataloga:

$$C_{a,izr} = F_m \cdot \sqrt[3]{\frac{L}{10^6}} = 816 \cdot \sqrt[3]{\frac{213.84 \cdot 10^6}{10^6}} = 4879.62 \text{ N} \approx 4880 \text{ N} \quad (5)$$

$$C_{a,izr} \approx 4880 \text{ N}$$

Odabrano je vreteno **SFU1605** sa sljedećim karakteristikama:

- promjer:  $d_o = 16 \text{ mm}$ ,
- korak:  $P = 5 \text{ mm}$ ,
- radni hod:  $l = 750 \text{ mm}$ ,
- dinamička nosivost:  $C_a = 7649 \text{ N (780 kgf)}$ ,
- statička nosivost:  $C_{oa} = 17\,554 \text{ N (1790 kgf)}$ ,
- krutost:  $K = 196\,200 \text{ N/m (20 kgf/}\mu\text{m)}$

Slijedi provjera kojom se utvrđuje da li će odabrano vreteno odgovarati zahtjevu gore izračunatog životnog vijeka u satima i okretajima:

$$L = \left(\frac{C_a}{F_m}\right)^3 \cdot 10^6 = \left(\frac{7649}{816}\right)^3 \cdot 10^6 \approx 823 \cdot 10^6 \text{ okretaja} \quad (6)$$

$$L > L_{izr}$$

$$L_h = \frac{L}{n_m \cdot 60} = \frac{823 \cdot 10^6}{297 \cdot 60} \approx 46220 \text{ h} \quad (7)$$

$$L_h > L_{h,izr}$$

Iz jednadžbi (6) i (7) je vidljivo da su uvjeti zadovoljeni za nekoliko puta pa se može izabrati vreteno manjih dimenzija i slabije dinamičke nosivosti. Kako su stolne glodalice svestrane i imaju široku primjenu nije na odmet ostaviti neke parametre predimenzionirane pa će tako odabir ostati na vretenu oznake SFU1605.

Kritična brzina vretena prema [3] uz jednostavno uležištenja krajeva:

$$n_{kr} = f_{n,kr} \cdot \frac{d_o}{l_{kr}^2} \cdot 10^7 = 12.1 \cdot \frac{16}{750^2} \cdot 10^7 \approx 3441.78 \text{ min}^{-1} \quad (8)$$

$$n_{kr} = 3441 \text{ min}^{-1}$$



Dopuštena radna brzina vretena:

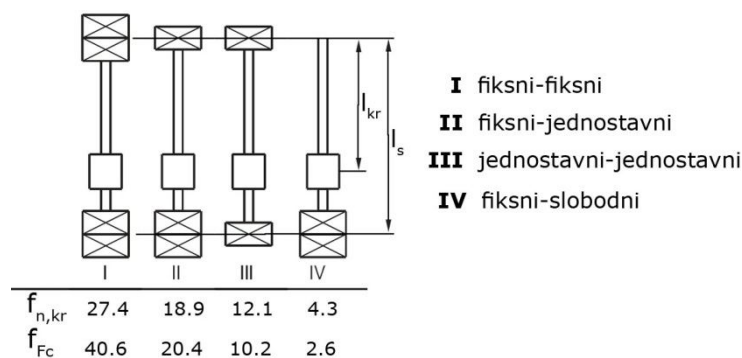
$$n_{dop} = n_{kr} \cdot 0.8 = 3441 \cdot 0.8 \approx 2752.8 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

$$n_{dop} = 2752 \text{ min}^{-1}$$

Brzine su također višestruko zadovoljene. Iako vretena mogu podnijeti puno veće okretaje, one su ograničene pogonskim dijelom (koračnim motorima).

U gornjim jednadžbama (8), (9) te jednadžbi (10):

- $f_{n,kr}$  - korektivni faktor koji ovisi o uležištenju vretena, tj. o osloncima spomenutim u gornjem tekstu (fiksni, jednostavni slobodni) [Slika 17],
- $f_{Fc}$  - korektivni faktor ovisan o ležajevima [Slika 17],
- $l_{kr}$  - kritična (najveća) duljina hoda matice na vretenu u  $mm$



Slika 17. Korektivni faktori ovisni o uležištenju

Dopuštene sile izvijanja na vretenu, teorijska (10) i dopuštena u radu (11):

$$F_{izv,t} = f_{Fc} \cdot \frac{d_o^4}{l_{kr}^2} \cdot 10^4 = 10.2 \cdot \frac{16^4}{750^2} \cdot 10^4 \approx 11883.6 \text{ N} \quad (10)$$

$$F_{izv,t} = 11883 \text{ N}$$

$$F_{izv} = \frac{F_{izv,t}}{2} = \frac{11883}{2} \approx 5941.5 \text{ N} \quad (11)$$

$$F_{izv} = 5941 \text{ N}$$

Iz jednadžbe (11) je vidljivo da su sile koje se javljaju u najopterećenijem režimu rada stroja (gruba obrada,  $F_2 = 1000 \text{ N}$ ) također zadovoljene.

$$F_{izv} > F_2 \quad (12)$$

Teorijska (13) i praktična efikasnost (14) vretena [4]:

$$\eta_t = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot d_0}{P} \cdot \mu} = \frac{1}{1 + \frac{\pi \cdot 16}{5} \cdot \mu} \approx 0.943 \quad (13)$$

$$\eta = \eta_t \cdot 0.9 = 0.943 \cdot 0.9 \approx 0.85 \quad (14)$$

$$\eta = 0.85$$

Iz dobivenih jednadžbi slijedi proračun pogonskog dijela. Ovdje će prikazati proračun prema kojem odabiremo snagu pogona a u sljedećem poglavlju će se detaljnije opisati pogonski dio stolnih glodalica.

Moment pogona potreban za najopterećeniji režim rada:

$$M_2 = \frac{F_2 \cdot P}{2000 \cdot \eta \cdot \pi} = \frac{1000 \cdot 5}{2000 \cdot 0.85 \cdot \pi} \approx 0.928 \text{ N} \quad (15)$$

$$M_2 = 0.94 \text{ Nm}$$

Ukupan potreban moment motora pri gibanju prema slici [Slika 15] :

$$M = \frac{(F_2 + \mu_{vod} \cdot m \cdot g + F_{pred}) \cdot P}{2000 \cdot \eta \cdot \pi} = \frac{(1000 + 0.15 \cdot 40 \cdot 9.81 + 153) \cdot 5}{2000 \cdot 0.85 \cdot \pi} \quad (16)$$

$$M = 1.13 \text{ Nm}$$

Podaci sila prednaprezanja vretena, masa stola sa obratkom i trenje klizanja vodicica korištenih u proračunu:

$$F_{pred} = 2\% \cdot C_a \approx 0.02 \cdot 7649 \approx 153 \text{ N}$$

$$m = m_1 + m_2 \approx 40 \text{ kg} \quad (17)$$

$$\mu_{vod} = 0.15$$

Sila prednaprezanja ovisi o izvedbi matice pa se tako u gornjoj jednadžbi (17) sila uzima kao dvopostotni iznos dinamičke nosivosti vretena ( preporuka *Bosch Rexroth* ). Ako se vretena koriste za veća opterećenja taj postotak se povećava. Svaki proizvođač daje naputke kako izračunati silu prednaprezanja ali se rijetko prilaže u katalogima već se češće daje moment prednaprezanja pa se neposredno može doći do sila.

Analogno ovom postupku izabiru se vretena i pogoni za preostale dvije osi koje ipak ne trpe tolika opterećenja. U praksi su sva tri vretena jednaka, samo različitih duljina.

### 2.3. Linearni ležajevi i vodilice

Uz KNV, koje je zaduženo za prijenos snage sa motora na osi stroja, za ostvarivanje linearnih gibanja stroja potrebno je projektirati mehanizme koji će to gibanje ostvariti uz minimalno opterećenje na pogonski dio. Postoje tri mogućnosti te izvedbe koje su spomenute u uvodu rada:

1. kuglični linearni ležajevi ( KLL ) i osovine okruglog profila
2. profilne vodilice
3. ostalo ( precizne profilne vodilice, različite izvedbe s kugličnim ležajevima )

Za stolne glodalice prikladne su sve tri opcije ali se najviše koriste prve dvije. Linearni ležajevi u kombinaciji sa osovinama nude veliki izbor [Slika 18]. Osim dimenzionalnih razlika u nominalnom promjeru i duljini, možemo ih podijeliti na:

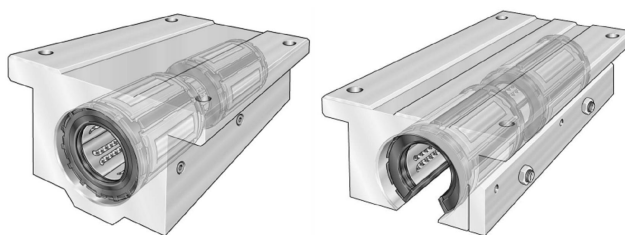
- kompaktne ( otvoreni i zatvoreni tip ),
- kompaktne sa kućištem ( otvoreni i zatvoreni tip ),
- KLL sa prirubnicom,
- „quadro“– dva paralelna KLL-a ( otvoreni i zatvoreni tip ),

Osnovne prednosti su im dobar omjer performansa i cijene, kompaktne dimenzije, lako održavanje i zamjena. Mogu podnijeti ubrzanja do  $100m/s^2$ , brzine do  $5m/s$ , a preciznost im je  $50\mu m$  na  $1000mm$ .



Slika 18. Linearni kuglični ležajevi [19]

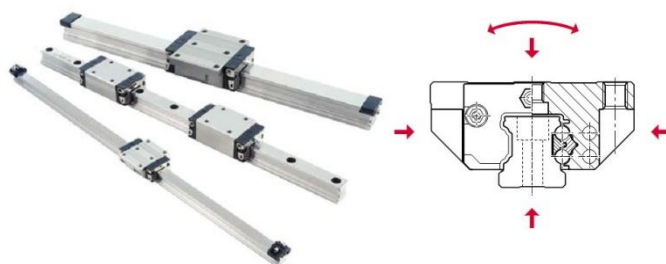
Vrlo česta izvedba ovih ležajeva su tzv. tandem ležajevi gdje su u jednom kućištu ugrađena dva kuglična ležajeva, slično kao što je bio primjer sa maticama kod KNV-a. Takvom konstrukcijom se postižu veće dinamičke nosivosti [Slika 19].



Slika 19. Tandem KLL [20]

Profilne linearne vodilice [Slika 20] imaju do nekoliko puta veću dinamičku nosivost od gore spomenutih ležajeva sa osovinom. Njihova primjena je profesionalne naravi koju karakterizira:

- visokog stupanj ponovljivosti,
- preciznost,
- krutost,
- jednakomjerno i glatko gibanje,
- dulji životni vijek, itd.



Slika 20. Profilne linearne vodilice [5]

Sastoje se od profilnih „tračnica“ različitih oblika po kojima se kreće klizač ( „vagončić“ ). U klizaču se nalaze kuglice koje recirkuliraju kao kod matica u KNV-u. Mogu biti jednakomjerno opterećene sa svih strana i podnose velike momente. Montaža i održavanje je su jednostavni kao i kod KLL-a ali zbog svih prednosti koje pružaju su financijski nedostupnije i ne koriste se često kod hobista.

Ostale izvedbe linearnih gibanja, osim preciznih linearnih vodilica, temelje se na različitim varijacijama sa klasičnim ili specijalnim kugličnim ležajevima pa tako razlikujemo:

- V-tip linearnih vodilica,
- profilne vodilice sa kugličnim ležajevima



Slika 21. Ostali primjeri linearnog vođenja [19]

Precizne linearne vodilice [Slika 22] su jednu razinu iznad profilnih vodilica u smislu njihove namjene i mogućnosti ali su slične građe kao one a princip rada im je isti. Razlika je u klizaču koji je kod profilnih linearnih vodilica značajno manji u odnosu na profil po kojemu klizi, dok su kod preciznih vodilica klizač i profil često istih duljina. Medij po kojem klizu jedan po drugoj mogu biti kuglice, valjci, iglice ili njihove kombinacije.



Slika 22. Precizne linearne vodilice [21]

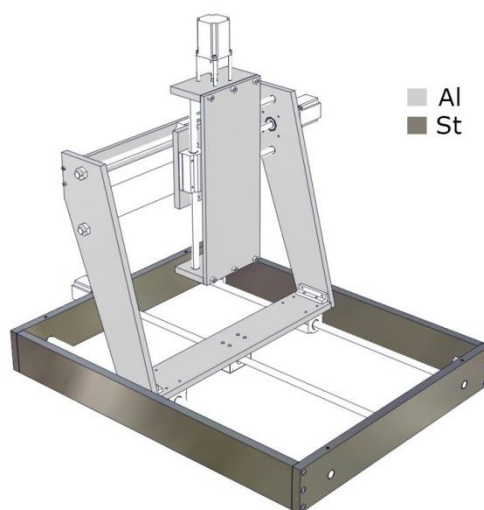
Kako su stolne glodalice većinom predviđene za obradu drva i eventualno aluminija, linearni ležajevi u kombinaciji sa osovinama sasvim zadovoljavaju potrebu. Profilne linearne vodilice su još uvijek financijski nedostupne za hobi-projekte pa se rijetko koriste. U ovom radu upotrijebljeni su linearni kuglični ležajevi u kućištu oznake **SCS16LUU** ( za „y“ i „z“ os ) i **SCS20LUU** ( „x“ os ) u kombinaciji sa ojačanim, kromiranim čeličnim osovinama.

## 2.4. Ostali materijal i izvedba konstrukcije

U prethodnim odjeljcima obradile su se osnovne mehaničke komponente ( vretena, linearno gibanje ) koje čine konstrukciju stolne glodalice. Sama konstrukcija glodalice opet zavisi o puno faktora, ponajprije namjeni koja pak određuje ostale zahtjeve i time sužava izbor. Nerijetko se manje zahtjevne hobi-glodalice izrađuju od drva, pleksiglasa ili tvrdih i jeftinih polimera. Puno bolja, ali i skuplja, opcija je uporaba standardnih aluminijskih profila. Uz malu masu nude veliku čvrstoću i otpornost na atmosferske utjecaje te fleksibilnost kod

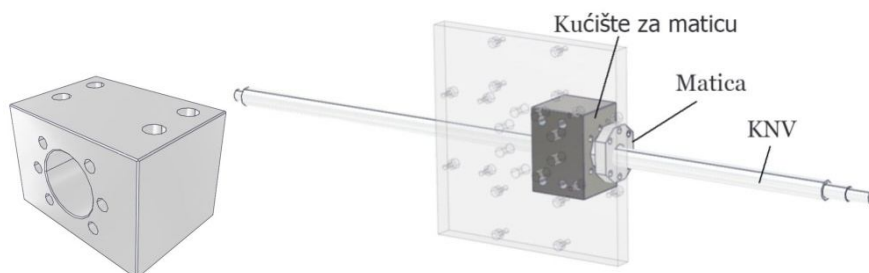
konstruiranja stroja. Mala masa koja je velika prednost ovih profila ujedno može biti veliki nedostatak i problem kod realizacije stolnih glodalica. Ukoliko se konstrukcija ne izvede na pravilan način (dulja „z“ os stroja, viši stroj) mogu se javiti momenti kod gibanja koji će za posljedicu imati nestabilnost čitavog stroja.

Materijal za izradu stroja u ovom radu je bio aluminij, odnosno čelik, nepoznate čistoće. Čelik (standardne ploče 100x20mm) je zbog dostupnosti i mase korišten za bazu stroja dok se aluminij (debljine 15mm i 10mm) koristio za pomični most stroja [Slika 23].



**Slika 23. Konstrukcija stroja sa naznačenim materijalom**

U odjeljku vezanom za KNV spomenula su se kućišta za maticu vretena [Slika 24]. Kućište ima jednostavnu funkciju povezivanja vretena (linearno gibanje matice) sa ostatkom sklopa (stol, nosači, itd.). Na tržištu postoje komercijalna kućišta koja se mogu naručiti uz vreteno ili se mogu samostalno projektirati i izraditi kućišta po mjeri i namjeni.



**Slika 24. Kućište za maticu vretena**

Povezivanje energetskog dijela, tj. motora sa vretenom predviđeno je pomoću malih fleksibilnih spojki (eng. *Flexible Shaft Coupling*).

Kod izbora spojki treba uzeti u obzir nekoliko parametara:

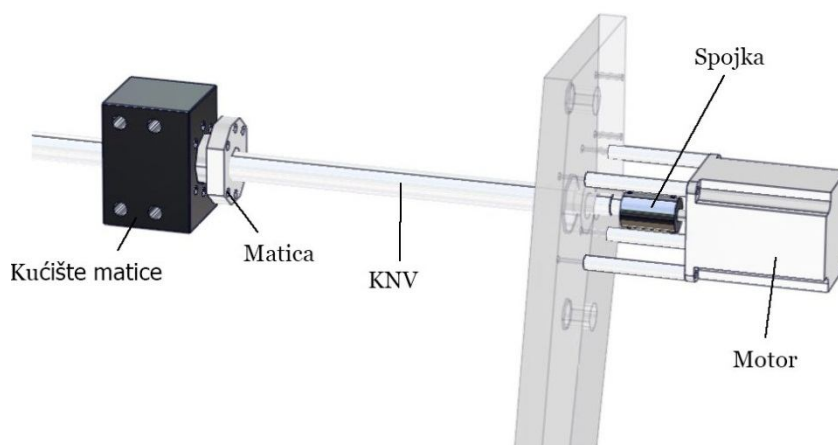
- torzijski moment,
- ekscentričnost osovine,
- broj okretaja,
- krutost spoja, itd.

Osim fleksibilnih spojki koje su povoljne i namijenjene sustavima u kojima se javljaju mali momenti, postoje još:

- krute spojke: veliki momenti; bez ekscentričnosti,
- spojke sa čeljustima: dobra apsorpcija udara,
- spojke sa diskovima: eliminacija mrtvog hoda,
- spojke sa mjevovima: eliminacija ekscentričnosti; visoka torzijska krutost,
- Oldham spojke: veliki momenti; male brzine



Slika 25. Spojke [22]

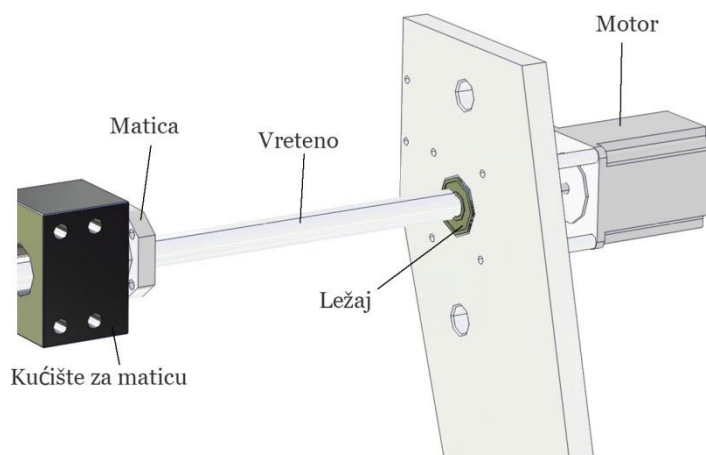


Slika 26. Spoj motora sa vretenom

Osim pomoću spojki, prijenos snage sa motora na vretena može se izvesti pomoću zupčanika te lančanim ili remenskim prijenosom. Kao i uvijek to prvenstveno zavisi o namjeni stroja.

U proračunu KNV-a svugdje su korišteni faktori za jednostavno uležištenje vretena. Preporuka kod takvih uležištenja je korištenje kugličnih ležaja sa kosim dodirom koji mogu

trpiti aksijalna i radijalna opterećenja. Zbog problema tokom obrade prvi izbor ležajeva oznaka, **7200 BEP** i **7201 BEP** zamijenjen je običnim jednorednim radijalnim ležajevima oznaka **6000-2Z** i **6201-2Z**. Ovime se svjesno smanjila dinamička nosivost ležajeva i njegov životni vijek ali se ne utječe na proračun iz poglavlja 2.2.1.



**Slika 27.    Primjer uležištenja vretena ( y os )**

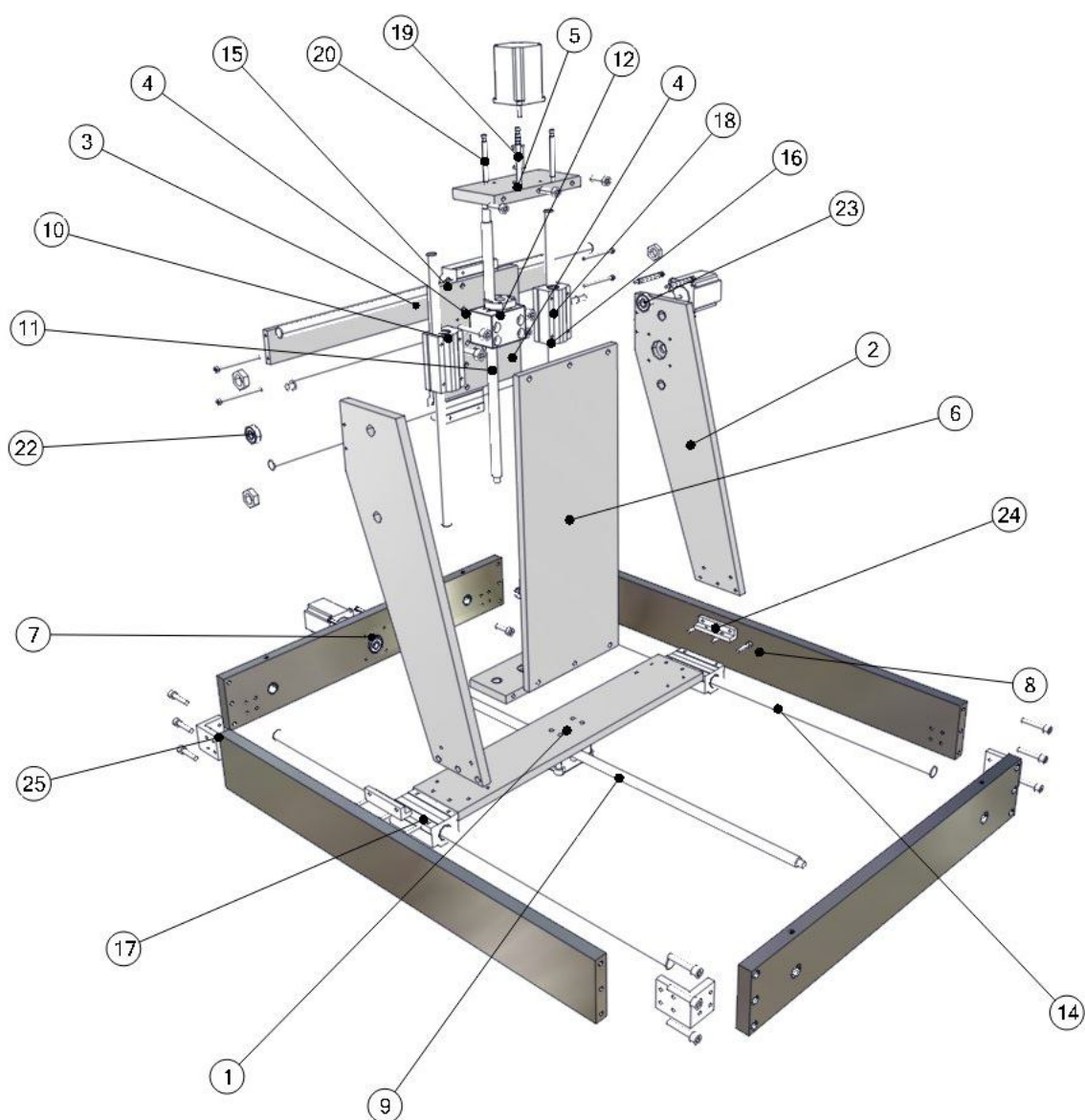
Pozicije stroja će biti povezane vijcima ( *DIN912*, *DIN913* ) jer se želi postići rastavljivi spoj za laku montažu i demontažu. Predviđena masa cijelog stroja, uključujući i energetske dio, iznositi će približno 100kg. Sklop se sastoji od 25 različitih pozicija a sveukupno ih ima 61 ( bez motora ). U tablici [Tabela 3] su popisani elementi sa svojim karakteristikama a na slici [Slika 28] su isti prikazani. Projekt je rađen u *Catiji* odakle su dobiveni podaci iz tablice.



Tabela 3. Popis pozicija stroja

BR.	NAZIV	MAT.	DIMENZIJE [mm]	VOLUMEN [m3]	MASA [kg]	KOL.
1.	Horizontala mosta	Al	570x100x15	8,55e-004	2,32	1
2.	Vertikala mosta	Al	500x150x15	9,37e-004	2,54	2
3.	Spoj vertikala	Al	570x50X10	3,42e-004	0,92	1
4.	Ploča po y	Al	175x175x15	4,6e-004	1,24	1
5.	Ploča po z (gore/dolje)	Al	175x85x15	2,23e-004	0,6	2
6.	Ploča po z	Al	430x175x10	7,52e-004	2	1
7.	Prednja/stražnja ploča	St	650x100x20	0,001	10,2	2
8.	Bočne stranice	St	800x100x20	0,002	12,6	2
9.	Vreteno x*	St	Ø16 L=850	1,65e-004	1,06	1
10.	Vreteno y*	St	Ø16 L=620	1,19e-004	0,7	1
11.	Vreteno z*	St	Ø16 L=450	8,50e-005	0,43	1
12.	Matica*	St	50x48x40	2,98e-005	0,24	3
13.	Kućište (bez obrade)	St	70x50x48	1,37e-004	1,1	3
14.	Osovina po x	St	Ø20 L=814	2,56e-004	2	2
15.	Osovina po y	St	Ø16 L=583	1,17e-004	0,92	2
16.	Osovina po z	St	Ø16 L=415	8,34e-005	0,66	2
17.	Lin. Ležaj*	/	Ø20 L=96	/	0,4	2
18.	Lin. Ležaj*	/	Ø16 L=85	/	0,3	4
19.	Spojke motora*	Al	Ø25 L=30	/	0,1	3
20.	Graničnik za motore	St	Ø5 L=15	/	0,1	12
21.	Radna ploča	/	840x560	/	/	1
22.	Ležaj 6000-2Z	/	10x26x8	/	0,019	3
23.	Ležaj 6201-2Z	/	12x32x10	/	0,037	3
24.	L profil B=8mm	St	20x20 L=80	1,19e-005	0,15	2
25.	L profil B=10mm	St	50x45 L=45	3,86e-005	0,3	4
					<b>Σ=93kg</b>	<b>Σ=61</b>

\*naručene komponente nepotvrđenih karakteristika



Slika 28. Stolna CNC glodalica (bez radne ploče)

### 3. ENERGETSKI DIO STROJA

#### 3.1. Koračni motori

Izbor pogonskog dijela stroja sužen je na dva izbora: servomotori ili koračni motori. U ovom radu opisat će se koračni motori jer je predviđeno da stroj bude temeljen na njima. Govorit će se o njihovoj primjeni, vrstama, karakteristikama, prednostima i nedostacima u odnosu na servomotore.

Koračni motori su elektromehanički pretvornici energije koji električne impulse pretvaraju u diskretne mehaničke pomake. Osovina motora rotira u diskretnim koracima kada se šalju ispravne sekvence naredbi. Uz poznavanje kuta zakreta koraka, u svakom trenutku se nakon niza impulsa zna rotacija motora. Na koračne motore se može gledati kao na električne motore bez komutatora. Uobičajeno za njih je da su svi namotaji dio statora, a rotor je permanentni magnet ili nazubljeni blokovi mekog magnetskog materijala. Karakteristike koračnih motora:

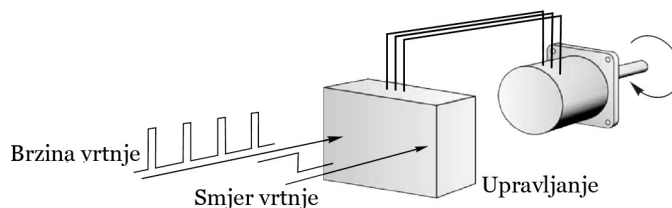
- kut rotacije je proporcionalan ulaznom impulsu,
- motor ( pod napajanjem ) u mirovanju drži maksimalni moment,
- precizno pozicioniranje i ponovljivost,
- brzi odzivi na pokretanje, zaustavljanje i promjenu smjera vrtnje,
- pouzdanost ( nema četkica pa životni vijek ovisi prvenstveno o ležajevima ),
- jednostavno upravljanje i cijena,
- širok raspon brzina ( brzina proporcionalna frekvenciji ulaznih impulsa )

Nedostaci koračnih motora su zahtjevnije upravljanje pri velikim brzinama, pojava rezonancija uz neadekvatno upravljanje te fiksni korak. Koračni motori se dijele prema:

- vrsti uzbude: permanentni, elektromagnetski,
- broju faza: 1 – 6,
- broju para polova: 1 – 90 ( serijski ), 1 – 4 ( stalni magneti ),
- načinu gibanja: rotacijski, linearni

Za razliku od servomotora čiji princip rada je u zatvorenoj petlji ( enkoderi koji očitavaju poziciju ), koračni motori nemaju povratnu petlju pa su stoga jeftiniji i jednostavniji za upravljanje. Upravljački program šalje dvije vrste signala koje upravljačka elektronika

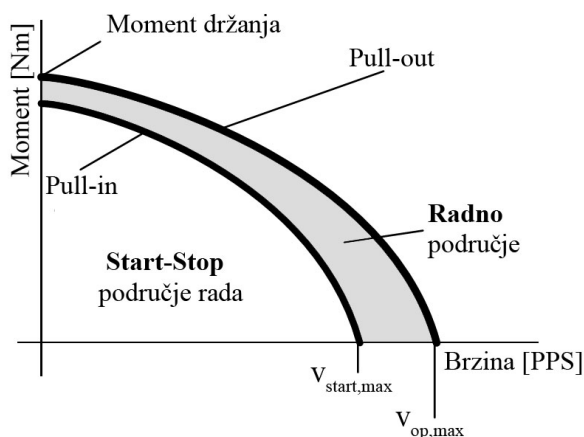
( eng. *driveri* ) koristi za pogon koračnih motora. To su impulsi koji definiraju brzinu vrtnje i smjer vrtnje motora [Slika 29].



**Slika 29. Signali koračnih motora [6]**

Osnovna svojstva prema kojima se još razlikuju koračni motori:

- *rezolucija*: broj koraka po jednom okretaju; mogućnost rada u mikrokoracima,
- *odziv jednog koraka*: brzina, oscilatornost, točnost,
- *statički moment motora*: moment držanja ( eng. *Holding Torque* ) – moment potreban za rotaciju osovine kada namotajima teče struja ustaljenog stanja ( eng. *Steady State Current* ), tj. motor je u mirovanju,
- *dinamički moment motora*: moment koji motor generira pri zadanom režimu rada ( broj koraka u jedinici vremena ); može se prezentirati kao *pull-in*<sup>4</sup> moment ili *pull-out*<sup>5</sup> moment



**Slika 30. Reprezentativni prikaz momenata koračnog motora [7]**

Na gornjoj slici [Slika 30] prikazana je krivulja *moment – brzina* na kojoj su prikazane karakteristične točke sa momentima. Sivo je označeno područje rada ( eng. *Slew Range* ) motora u kojemu se on ne može direktno pokrenuti niti zaustaviti, tek kad se uđe u *start* –

<sup>4</sup> Moment koji motor može dati bez preskakanja koraka pri određenom broju impulsa koji se šalju na namotaje ( eng. *Pulse rate*, jedinice - *Pulse Per Second*, PPS), tj. pri ubrzanju.

<sup>5</sup> Moment koji motor može dati pri operativnim brzinama.

stop područje rada motor možemo pokrenuti i zaustaviti. Na apscisi su još kotirane dvije brzine:

- $v_{start,max}$ : najveća frekvencija pri kojoj možemo motor pokrenuti,
- $v_{op,max}$ : najveća operativna frekvencija motora

Gore prikazana krivulja može značajno varirati od onog što proizvođač deklarira ako nije adekvatno upravljanje, stoga jednaku pažnju treba obratiti na upravljačku elektroniku kojim će se motori upravljati.

Prema strukturi građe, na tržištu razlikujemo tri vrste koračnih motora:

- sa stalnim magnetima ( eng. *Permanent Magnet, PM* ),
- reluktantni ( reaktivni ) motori ( eng. *Variable Reluctance, VR* ),
- hibridni motori ( eng. *Hybrid, HB* )

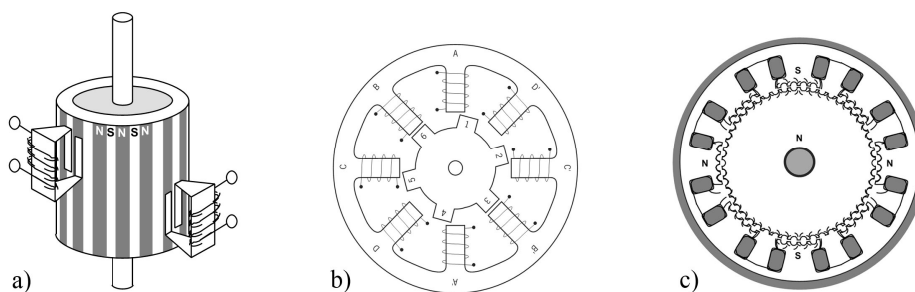
Motore sa stalnim magnetom ( PM ) i reluktantne motore ( VR ) se može jednostavno razlikovati kada se ručno zarotira osovinu ( motori nisu pod napajanjem ). Kod PM motora se osjeti veći otpor pri zakretanju i izraženiji su koraci motora zbog permanentnog magneta, dok se VR motor pri ručnom zakretanju okreće puno slobodnije. Može ih se razlikovati i mjerenjem otpora između namotaja. VR motori imaju 3 ( nekad 4 ) namotaja sa jednom zajedničkom žicom ( eng. *common return* ) dok PM motori redovito imaju dva odvojena namotaja od kojih svaki namotaj može ( ali ne mora ) imati centralni izvod. Hibridni motori razlikuju se od PM motora najviše u principu upravljanja i polako ih zamjenjuju.

PM motori imaju malu rezoluciju pa su stoga jeftiniji. Često se u literaturama nazivaju „limenkama“ ( eng. *Tin Can* ) zbog svoje strukture [Slika 31a]. Kao što im ime govori imaju permanentni magnet, rotor je magnetiziran sjevernim i južnim polovima smještenim paralelno u odnosu na osovinu rotora. Intenzitet magnetskog toka koji se javlja zbog takve strukture daje ovom tipu motora veće momente u odnosu na VR motore. Prednosti su im još veliki omjer statičkog momenta i dimenzija, manja snaga potrebna za rad, bolje prigušivanje odziva i mehanička jednostavnost. Osim velike rezolucije (  $7.5^\circ - 15^\circ$  ) nedostaci su im male brzine rada, mali omjer zakretnog momenta i momenta inercije motora, mogućnost demagnetizacije rotora kod prevelike pobude, te promjena jakosti permanentnog magneta.

VR motori imaju višepolni nazubljeni rotor od mekog željeza a na statoru, koji je također nazubljen, nalaze se namotaji [Slika 31b]. Motori mogu imati jedan paket statora ili više njih. Kut koraka dakle ovisi o broju zuba statora i rotora, načinu namatanja statorskih faza i načinu

njihove pobude. Zato jer za pobudu ne koriste permanentne magnete dizajn ovih motora je jednostavniji što ih čini robusnijima. Za razliku od PM motora, kod VR motora nije toliko izražen pad momenta pri porastu brzine pa nisu potrebni reduktori i ostali zupčasti mehanizmi. Razlika između njih je još što su VR motori bučniji u radu.

HB motori uzimaju dobre karakteristike gore spomenutih izvedbi koračnih motora. Rotor je nazubljen kao kod VR motora sa aksijalno magnetiziranim koncentričnim magnetom oko osovine [Slika 31c]. Zubi na rotoru su dizajnirani tako da se dobiva bolji magnetski tok koji za posljedicu ima veći statički i dinamički moment motora u usporedbi VR i PM. Hibridni motori su zato znatno skuplji od PM motora ali uz bolje performanse – rezolucija koraka ( $3.6^\circ - 0.9^\circ$ ), momenti i brzine. Ovakav motor izabran je za pogon stolne CNC glodalice.

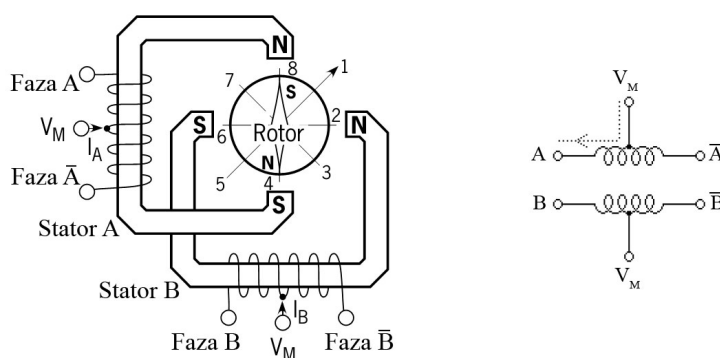


**Slika 31. Građa koračnih motora: a) PM, b) VR, c) HB [7]**

Osim prema građi, koračne motore se na tržištu može razlikovati i prema spoju namotaja:

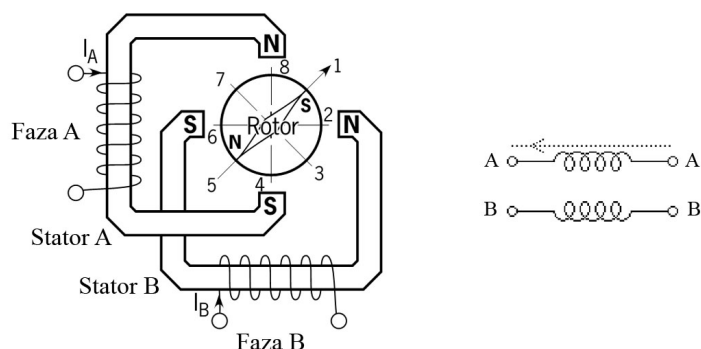
- uniporalni,
- bipolarni,
- bifilarni

Unipolarne motore se može prepoznati po 5 ili 6 žica na koje se spaja upravljački sklop. Mogu biti u PM ili HB izvedbi a karakterizira ih centralni izvod ( eng. *Center Tap* ) na svakom namotaju. Na jedan od ta dva izvoda ( pola ) ulazi struja za pokretanje motora pa otuda naziv unipolarni motori. U praksi su se često ovi motori nazivali četverofazni zbog centralnih izvoda koji svaku od faza fiktivno dijele na još dvije. Na taj centralni izvod se spaja pozitivni pol napajanja a krajevi faza su uzemljeni i njima se okreće smjer polja na namotajima [Slika 32]. Upravo zbog takvog spoja namotaja unipolarnim motorima je jednostavnije upravljati, tj. jeftinija je upravljačka elektronika ( eng. *Driver* ). Bitno je napomenuti da se unipolarni motori mogu upravljati elektronikom za bipolarne motore tako da se pri spajanju izostavi centralni izvod. Posljedica toga je značajan pad momenta motora.



Slika 32. Namotaji unipolarnog motora [7],[8]

Bipolarni motori konstrukcijski se ne razlikuju od unipolarnih ( mogu biti PM ili HB ) ali su im namotaji jednostavnije povezani, bez centralnih izvoda ( 4 žice ). Zbog te razlike motor je jednostavnije građe ali je potrebno kompleksnije upravljanje kako bi se „okrenuo“ polaritet na parovima polova [Slika 33]. Kod upravljanja ovih motora koristi se H – most koji će biti objašnjen u kasnijem odjeljku. Poznato je da na moment motora proporcionalno utječe jakost magnetskog polja na namotajima statora. Jakost magnetskog polja može se povećati većim brojem namotaja ili povećanjem struje kroz njih, što za posljedicu ima veće zagrijavanje motora uslijed disipacije snage. Kako bipolarni motori imaju upola manji otpor na bakrenim namotajima motora, manje je zagrijavanje, struja se može povećati faktorom  $\sqrt{2}$ , a posljedica toga je veći moment. Bipolarni motori, dakle, mogu imati do 40% veće momente u usporedbi sa unipolarnim.



Slika 33. Namotaji bipolarnog motora [7], [8]

Bifilarni motori imaju geometriju rotora i statora kao kod bipolarnih motora. Umjesto spoja jedne žice na svaku jezgru statora kao kod bipolarnih motora, bifilarni spoj namotaja koristi dvije žice koje su međusobno povezane u paralelu pa ti motori imaju 8 žica. Ovi motori mogu se spojiti u unipolarni ili bipolarni format. Na tržištu su ranije često bili bipolarni motori sa 6 žica koji su u stvarnosti bili bifilarni motori „prespojeni“ kao bipolarni.

Kod prespajanja namotaja, primjerice unipolarni motor u bipolarni i izostavljanje centralnog izvoda, preporuka je da se nazivni napon koji proizvođač propisuje poveća a nazivna struja smanji. Ovisno o načinu spajanja namotaja u tablici [Tabela 4] su dane vrijednosti u odnosu na unipolarni spoj motora.

**Tabela 4. Nazivne vrijednosti motora ovisno o spoju**

SPOJ	R [ $\Omega$ ]	L [mH]	I [A]	U [V]	M [Nm]
Unipolarni	N	N	N	N	N
Bipolarni – serijski	2N	4N	$(\sqrt{2}/2)N$	$\sqrt{2}N$	$\sqrt{2}N$
Bipolarni – paralelno	N	N	N	N	N
Bipolarno – pola nam.	0.5N	N	$\sqrt{2}N$	$(\sqrt{2}/2)N$	$\sqrt{2}N$
N – nazivna vrijednost koju propisuje proizvođač na naljepnici motora ili u katalogu					

**Tabela 5. Spajanja namotaja motora**

Bipolarno (4 žice)	Unipolarno (6 žica)	Bipol. serijski (6 žica)
Unipolarno (8 žica)	Bipol. serijski (8 žica)	Bipol. paralelno (8 žica)

Za dobivanje vrijednosti iz [Tabela 4] potrebno je poznavati sljedeće relacije:

- induktivitet raste sa kvadratom broja namotaja žice:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l} \quad (18)$$

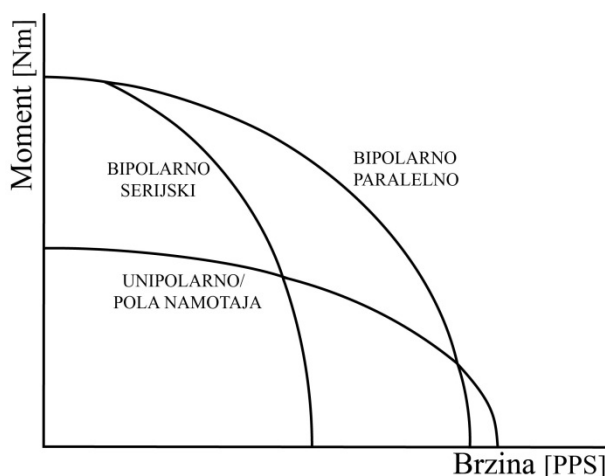
- porastom namotaja raste i otpor koji uvrštavanjem u donju formulu (19) daje relacije između napona, struje i poznatog otpora:



$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 \cdot R \quad (19)$$

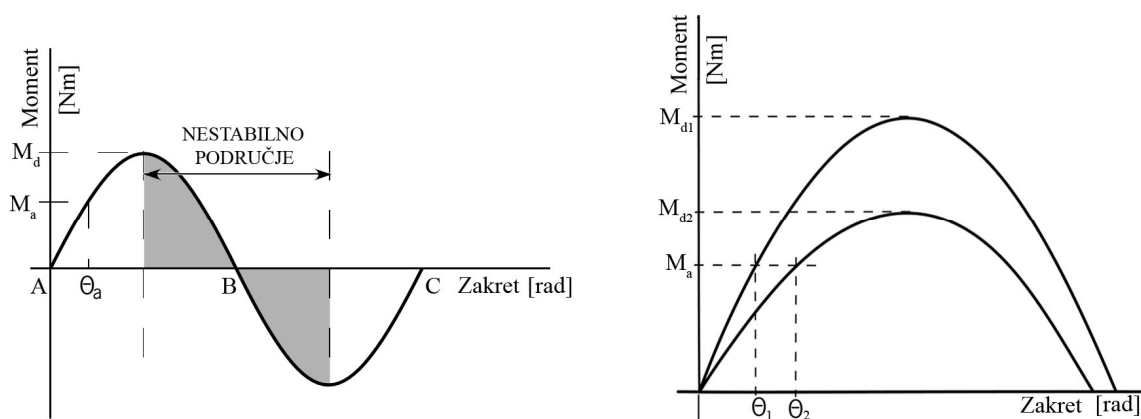
- imajući u vidu da moment motora raste proporcionalno struji, tj. umnošku struje i ampera po namotaju zavojnice ( eng. *Ampere Turns*, AT ) te zajedno sa gornjim formulama (18) i (19) dobivamo relacije iz [Tabela 4].

Na donjoj slici [Slika 34] prikazane su karakteristike pojedinog spoja. Prednost unipolarnog spoja su veće brzine ali i znatno manji momenti. Bipolarni motori daju veće momente ali i manje maksimalne brzine rada.



**Slika 34. Reprezentativni krivulja moment – brzina ovisna o spoju namotaja [9]**

Bitno kod koračnih motora je odnos momenta na kut zakreta rotora. Kod idealnih motora ta krivulja je sinusnog oblika [Slika 35 lijevo]. Točke A i C su točke ravnoteže u slučaju kada na osovinu nema nikakvih vanjskih opterećenja. Kada se na osovinu dovede vanjsko opterećenje  $M_a$ , rotor motora se pomakne za kut  $\theta_a$ . Ovisno o tome da li motor ubrzava ili usporava, rotor će se zaustaviti na poziciji koja je definirana tim kutom pomaka. Pri tom ubrzanju ili usporavanju motor generira moment koji će zakrenuti tu vanjsku silu koja djeluje na osovinu te će, nakon što postigne maksimum (moment držanja,  $M_d$ ), motor prijeći u nestabilno područje rada gdje se generiraju negativni momenti. Rotor motora preskače nestabilne točke rada sve do točke C koja je ravnotežna točka. Kut zakreta rotora  $\theta_a$  može dovesti do grešaka u koracima motora. To se može riješiti većim momentom držanja čime se smanjuje taj zakret rotora ( $\theta_1 < \theta_2$ ) [Slika 35 desno].

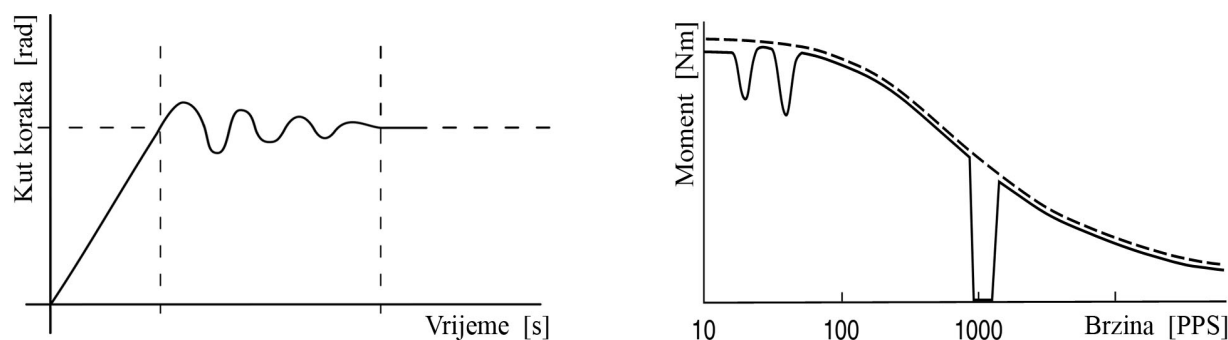


Slika 35. Ovisnost momenta i kuta zakreta osovine motora [9]

Koračni motori danas nude odstupanje 3% - 5% od stvarnog kuta zakreta motora. Ta je greška naravno nekumulativna i ne stvara probleme u radu. Ona je proizvod nesavršenosti u mehaničkoj izradi motora. Kada se govori o greškama u koraku razlikuju se dvije vrste grešaka:

- *greška pozicioniranja koraka*: najveća greška pozicioniranja nakon rotacije osovine motora za jedan korak
- *greška pozicioniranja*: mjeri se kut nakon svakog koraka (  $N=360/\text{kut koraka}$  ) te se uspoređuje konačna pozicija sa teoretskom

Na nestabilnost u radu motora slabo utječu greške koraka ali zato pojava rezonancije često može značajno utjecati na rad. Proizvođači rijetko na krivuljama *moment – brzina* prikazuju te podatke, koji za posljedicu imaju pad momenta pri određenim brzinama. Na magnitudu i lokaciju pada momenta utječu karakteristike motora, upravljačka elektronika sa modom rada ( puni, pola ili mikro korak ) i opterećenjem motora. Jedan od izvora pojave rezonancije potječe iz oscilatornosti koraka motora [Slika 36]. To se događa pri podudaranju frekvencije koraka motora sa prirodnom frekvencijom oscilacija rotora. Posljedica je gubitak koraka u radu. Nestabilnost se može još javiti pri visokim brzinama kao posljedica kolektivnog zatajenja rada upravljačke elektronike i motora [Slika 36]. Ova vrsta nestabilnosti nekad nema jasnih uzročnika pa često isti sustav radi ili ne radi pri značajnim promjenama temperature. Rezonancije ovog tipa rješavaju se kompleksnijim upravljanjem sa prigušivanjem.



Slika 36. Uzrok rezonancije (lijevo) i primjer pada momenta pri rezonanciji [6], [9]

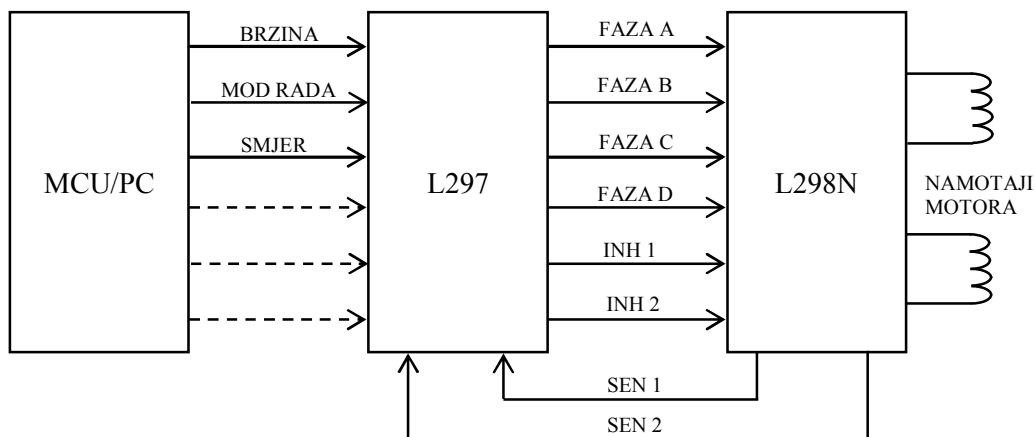
U ovom odjeljku spomenut je princip rada koračnih motora, njihova podjela i karakteristike. Valja još spomenuti da motori prema snazi i po standardu imaju različite veličine okvira. Svi koračni motori zadovoljavaju NEMA ( eng. *National Electrical Manufacturers Standard* ) standard. Za izradu stroja odabran je dvofazni hibridni motor sa 6 žica čiji namotaji će biti vezani u bipolarni serijski spoj. Proizvođač je ACT Motors, oznaka motora je **23HS6620**. Isti motor biti će implementirani na sve tri osi. Prema proračunu iz prijašnjeg odjeljka ovi motori po snazi graniče sa postavljenim zahtjevima. Zbog financijske konkurentnosti stroja, uvjeta na tržištu pri kupnji ali i garancije iz prakse kako će motori zadovoljiti potrebe izbor je pao na spomenuti model.

### 3.2. Upravljačka elektronika

Upravljačka elektronika diktira rad koračnih motora. Bez nje motori su beskorisni pa je stoga bitno poznavati njezinu strukturu i mogućnosti kako bi se motori mogli maksimalno iskoristiti. Zadatak upravljačke elektronike je povezati računalu ( ili mikrokontroler ) sa izvršnim elementima. Oni interpretiraju programske naredbe i parametre te ih realiziraju preko aktuatora. U engleskoj terminologiji kada se govori o upravljačkoj elektronici namijenjenoj kontroli koračnih motora govori se o *driverima*. Postoji puno komercijalnih izdanja kontrolera koji se mogu zasebno kupiti i implementirati sa motorima. Najčešće proizvođači motora preporučuju ( većinom vlastite proizvode ) koju elektroniku uzeti uz motore radi bolje efikasnosti.

U ovom odjeljku opisat će se kombinacija rada čipa L297 sa L298N. Ovo je omiljeno rješenje kod hobista zbog financija, jednostavnosti ali i pouzdanosti. Njima je moguće upravljati motorima struje do 4A, a to su već motori koji pronalaze ozbiljnu primjenu i daju velike momente. Čipovi su proizvod SGS – Thomson Microelectronics grupe, L297 se

službeno naziva kontroler koračnih motora ( eng. *Stepper Motor Controller* ) koji generira signale za motore, dok *L298N* ( eng. *Dual Full – Bridge Driver* ) sadrži dva H – mosta i radi sa naponima do 46V. Na slici dolje [Slika 37] shematski je prikazan njihov spoj.



Slika 37. Shema spoja elektroničkog upravljanja

*L297* prima tri bitna signala od strane računala ( ili MCU-a ) od kojih generira kontrolne signale za pokretanje motora preko *L298N*. To su:

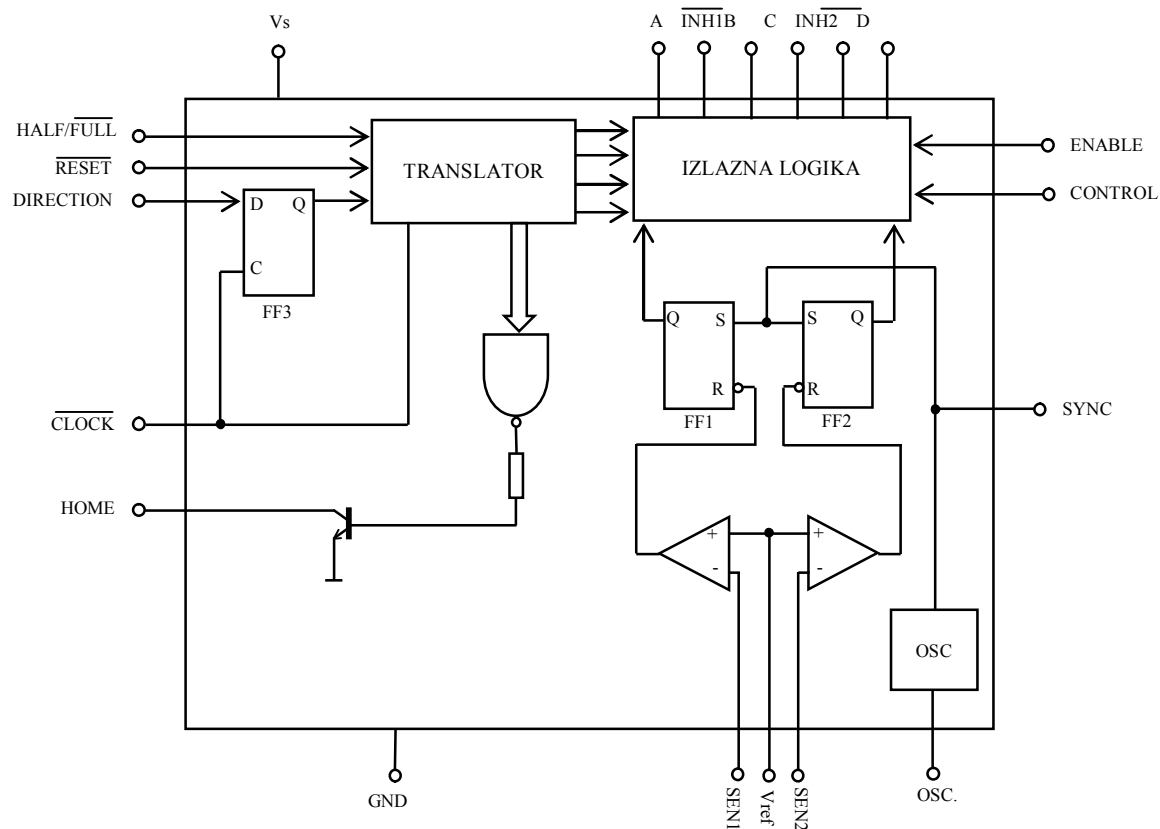
- brzina impulsa ( eng. *Clock* ),
- signali načina rada ( eng. *Mode Signals* ): puni korak, polukorak ( eng. *Full/Half Step* ),
- smjer vrtnje ( eng. *Direction* )

Glavnu zadaću u *L297* obavlja translator [Slika 38] u koji ulaze gornja tri signala. Translator može generirati tri različite sekvence ovisno o signalu koji definira način rada ( *Half/Full* ). Njima je definirano uključivanje namotaja motora, a time i sam način rada. Razlikujemo sljedeća tri načina rada:

- *normalni*: pobuđivanje obje faze motora,
- *sljedni* ( eng. *Wave Drive* ): pobuđivanje samo jedne faze u svakom trenutku,
- *polukorak* ( eng. *Half Step* ): kombinacija pobuđivanja obje faze pa zatim jedne

Sa blok dijagrama [Slika 38] vidljivo je da izlazna logika čipa generira dodatna dva signala, INHIBIT 1 ( INH1 ) i INHIBIT 2 ( INH2 ). Ti signali se šalju u *Wave* i *Half Step* načinu rada motora. To su signali koji ubrzavaju propad struje ( eng. *Current Decay* ) u namotajima koji se ne pobuđuju u gledanom trenutku. Propad struje je bitan kod bipolarnih motora a izravna je posljedica induktivnosti. Kada se *L297* koristi za kontrolu unipolarnih motora, preko INH1 i

INH2 linija djeluje *chopper*<sup>6</sup>. Da li će *chopper* djelovati na fazne linije ( A, B, C, D ) ili *inhibit* linije, upravlja se preko CONTROL signala.



**Slika 38. Blok dijagram L297**

*Chopper* u gornjem blok dijagramu [Slika 38] čini oscilator koji daje frekvenciju prema kojoj se postavljaju stanja na bistabilima *FF1* i *FF2*. Kada struja postigne maksimalnu vršnu vrijednost, napon na otpornicima spojenim na ulaz *SEN1* i *SEN2* jednak je naponu  $V_{ref}$  te se preko komparatora bistabili resetiraju i čekaju sljedeći impuls sa oscilatora.  $V_{ref}$  koji definira vršnu struju podešava se preko naponskog dijeljitelja. U tablici [Tabela 6] su dane ostale funkcije pinova.

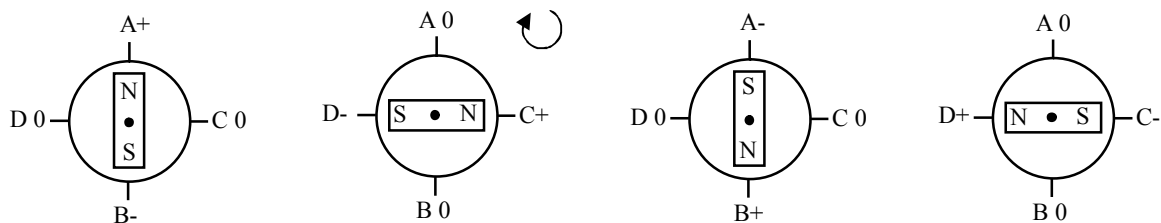
<sup>6</sup>*Električni chopper* može se zamisliti kao električni prekidač koji pod utjecajem jednog signala djeluje na drugi i tako regulira strujni krug. Kod L297 on je u funkciji regulacije maksimalne dopuštene struje na namotajima.

Tabela 6. Pinovi i funkcije L297

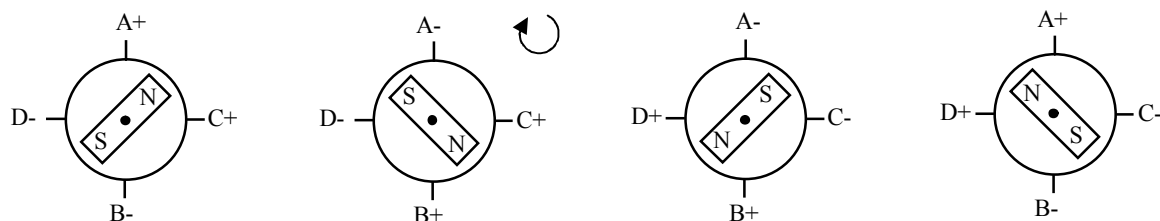
PIN	IME	FUNKCIJA
1	SYNC	Sinkronizacija oscilatora kod spajanja više L297 čipova. Smanjuje se el. šum i koristi samo jedna RC mreža za sve čipove.
2	GND	Uzemljenje.
3	HOME	Izlaz ( tipa otvoreni kolektor ) koji indicira inicijalno stanje čipa. Tranzistor je otvoren kod aktivnog signala.
4	A	Faza motora.
5	$\overline{\text{INH1}}$	Aktivno na niskom signalu, za kontrolu faza A i B. Kod bipolarnih motora ubrzava propad struje na namotajima. Regulacija vršne struje.
6	B	Faza motora.
7	C	Faza motora.
8	$\overline{\text{INH2}}$	Iste funkcije kao INH1 ali za faze C i D.
9	D	Faza motora.
10	ENABLE	Uključivanje funkcija čipa.
11	CONTROL	Definira funkcije <i>choppera</i> . Nizak signal – <i>chopper</i> na INH1 i INH2; visok signal – <i>chopper</i> na fazne linije ABCD,
12	Vs	Napajanje 5V.
13	SENS2	Ulaz napona koji regulira vršnu struju na fazama C i D.
14	SENS1	Isto kao SENS2 ali za A i B.
15	Vref	Nazivni napona koji definira rad <i>choppera</i> , tj. vršnu struju.
16	OSC	RC mreža, definira frekvenciju rada <i>choppera</i> .
17	$\text{CW}/\overline{\text{CCW}}$	Smjer vrtnje. U smjeru kazaljke na satu/obrnuto od smjera kazaljke na satu.
18	$\overline{\text{CLOCK}}$	Impulsi za određivanje brzine koraka. Rotor se pomakne za korak na svakom uzlaznom bridu ovog signala.
19	$\text{HALF}/\overline{\text{FULL}}$	Visoki signal za polukorak, niski za puni korak. Puni korak + stanje translatora na parnom broju = normalni mod rada. Puni korak + stanje translator na neparnom broju = slijedni mod rada.
20	$\overline{\text{RESET}}$	Niski signal resetira translator na nominalnu poziciju ( ABCD = 0101 ).

U nastavku je prikazan primjer slanja sekvenci za tri načina rada bipolarnog motora sa permanentnim magnetom. Rotirajući magnet okružen je sa četiri statorska pola na kojima su namotaji ( faze ). U realnosti motori imaju više koraka i polova a primjer je priložen radi razumijevanja principa rada.

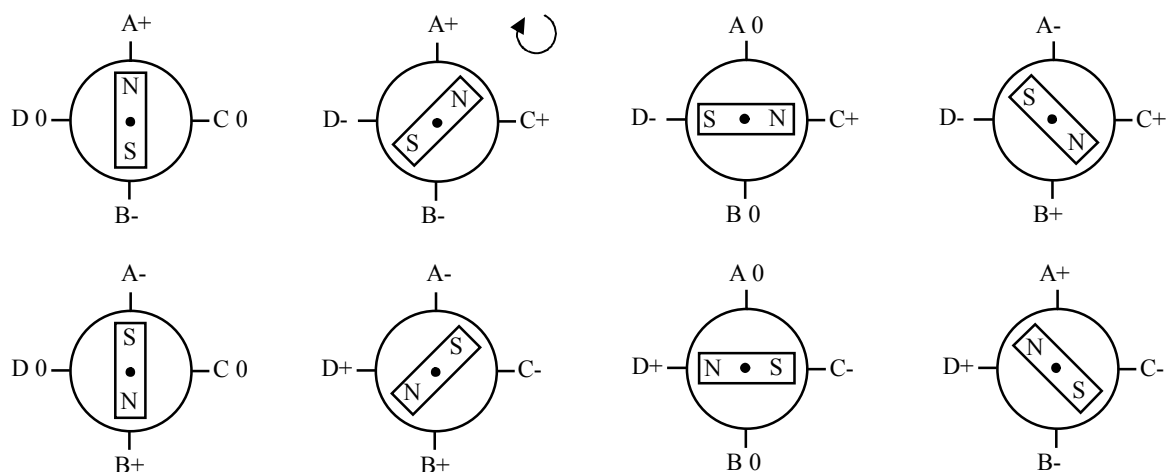
*Wave drive*, tj. slijedni način rada sa uključenom jednom fazom u svakom trenutku:



*Normal drive*, pobuđivanje obje faze:

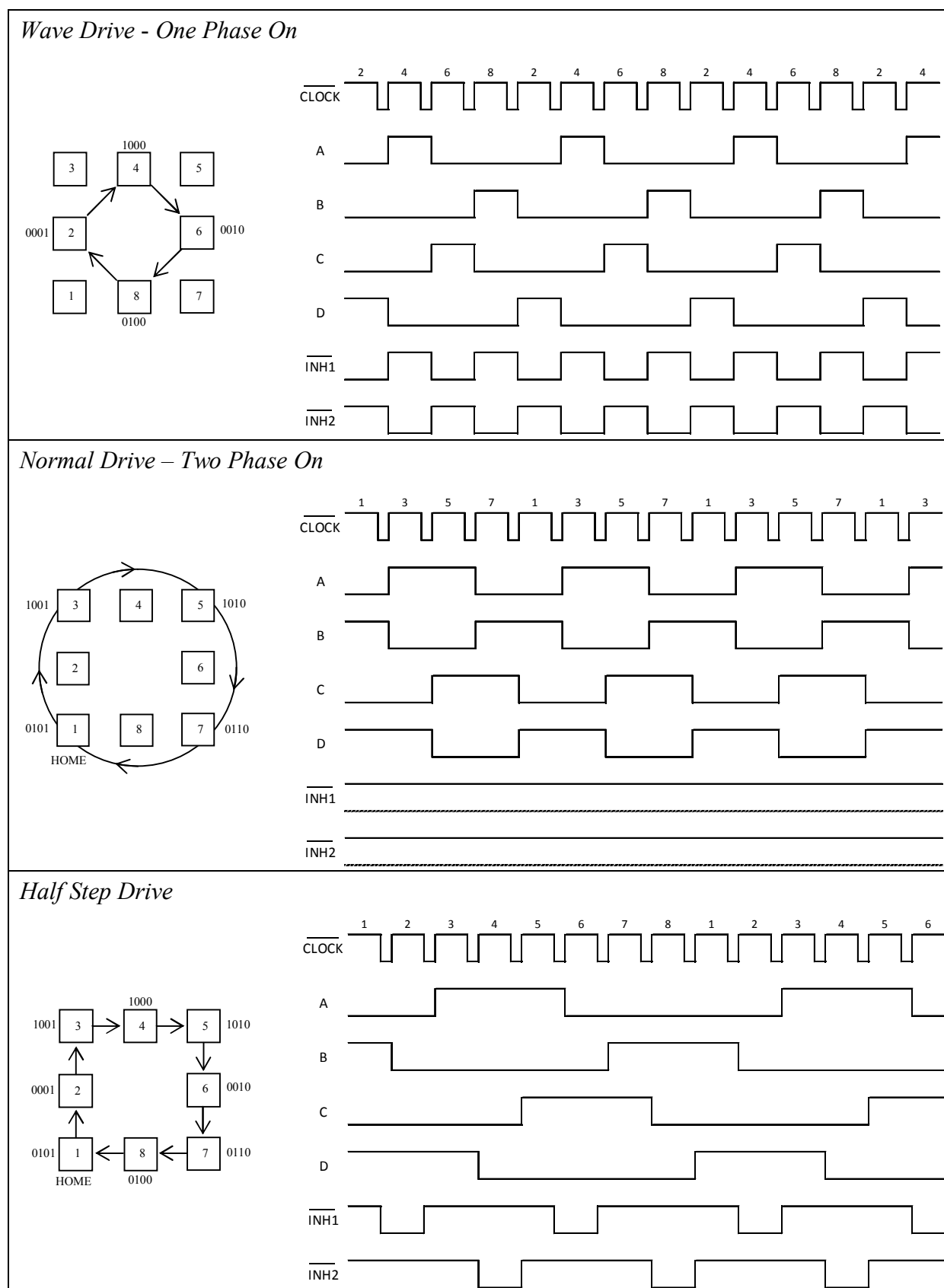


*Half Step*, pobuđivanje jedne pa zatim obje faze:



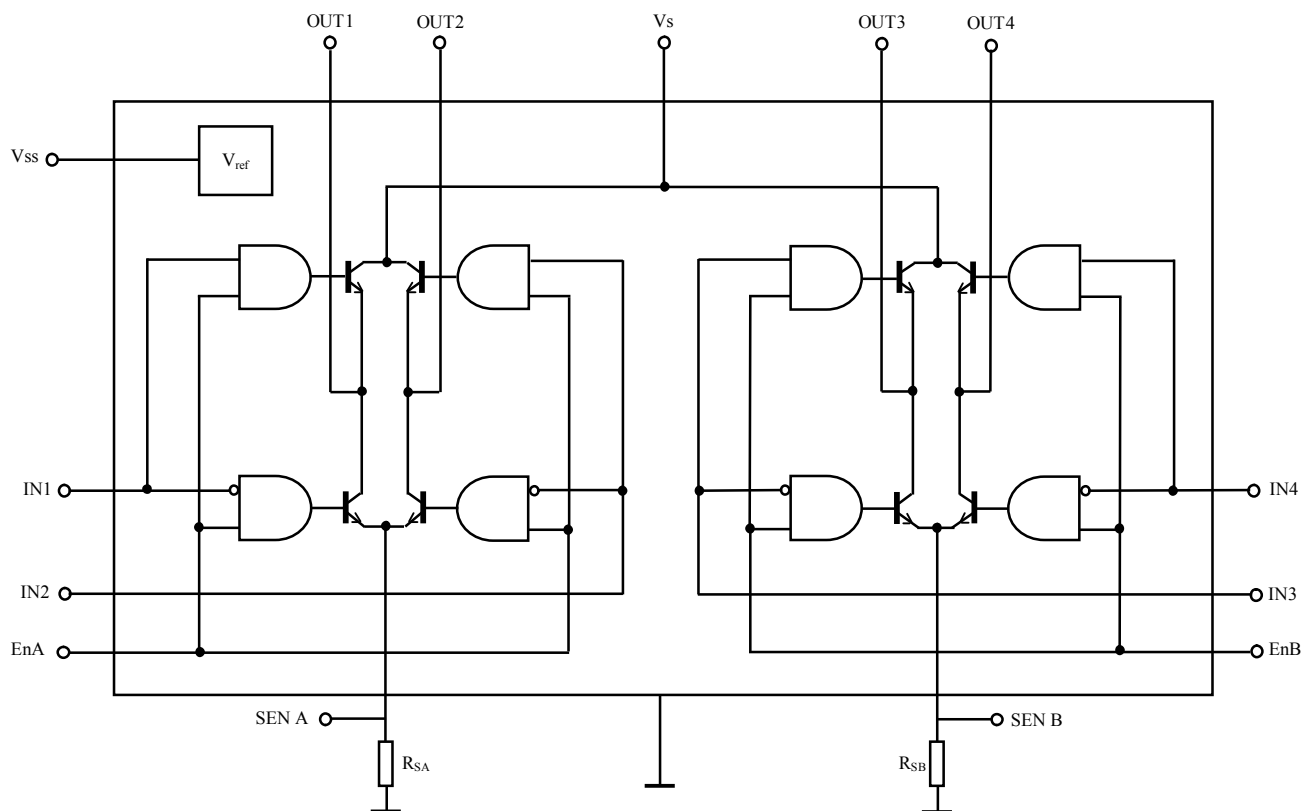
Translator u *L297* je u suštini 3-bitni brojač sa kombinacijskom logikom koji na izlazu, u osam koraka, generira binarni kod. U nastavku [Tabela 7] su prikazane sekvence i izlazni signali za svaki način rada motora koji nudi *L297*. Najviše momenta se dobije kada se motor regulira u normalnom modu, tj. kada se pobuđuju dvije faze. Kod režima polukorak, dobije se jednakomjernije gibanje i povećava rezolucija koraka, ali se gubi i do 15% momenta.

Tabela 7. Sekvence i izlazni signali kod različitih načina rada motora [10]





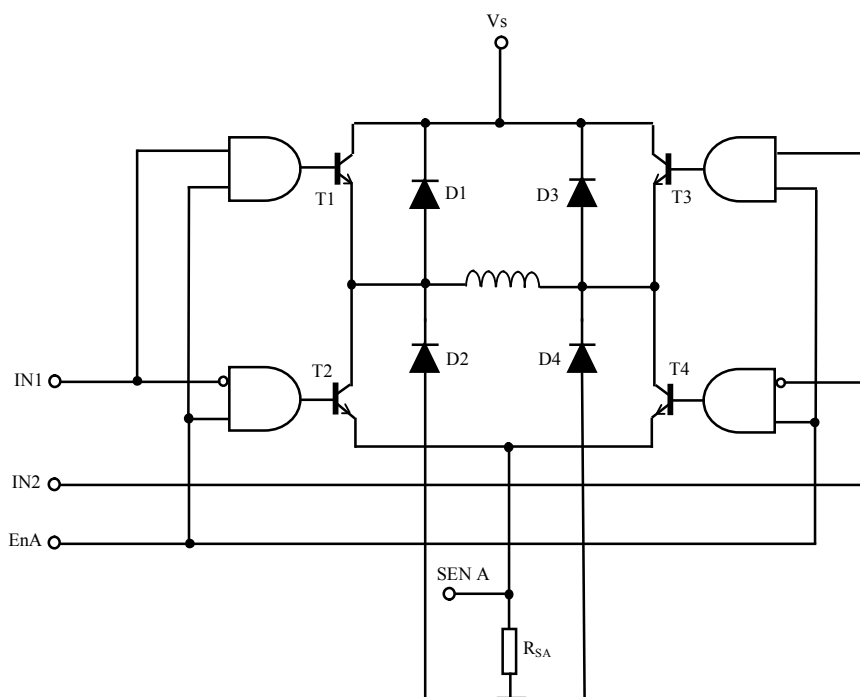
*L298N* integrirani krug radi sa visokim naponima ( 46V ) i strujama ( 4A ) te je pogodan za upravljanje relejevima, solenoidima, DC i koračnim motorima, tj. svugdje gdje induktivnost igra veliku ulogu. Pri tome koristi standardne TTL logičke razine napajanja. Interno, *L298N* ima dva H – mosta što je idealno za upravljanje dvofaznim bipolarnim motorima [Slika 39].



Slika 39. L298N blok dijagram

INH1 i INH2 signali sa *L297* kontrolera ovdje su pod oznakama EnA i EnB, dok su IN1 do IN4 ( eng. *Inputs* ) faze motora sa *L297*, tj. izlazi A, B, C, D. Ako se pogleda blok dijagram samo jednog mosta [Slika 40] kojim se kontrolira jedna faza motora dobije se bolja slika koja je funkcija *inhibit* signala. IN1 i IN2 signali definiraju koji *push – pull* tranzistorski par će biti uključen, dok EnA ( INH1 sa *L297* ) omogućuje kontrolu nad sva četiri tranzistora. Za primjer uzmimo da je IN1 u logičkoj jedinici ( visoki signal, eng. *high signal* ) a IN2 logička nula ( niski signal, eng. *low signal* ). Struja u tom slučaju prolazi kroz T1, T4 i namotaj motora. Ako bi signal na IN1 pao ( logička nula ) došlo bi do recirkulacije struje kroz D2, T4 i otpornik Rs što za posljedicu ima sporiji propad struje i veću disipaciju na otporniku. Ako pak se uz pad signala na IN1 aktivira EnA, isključuju se sva četiri tranzistora a struja recirkulira iz uzemljenja prema Vs prolazeći kroz D2 i D3 te se tako znatno ubrzava njezin propad.

Brži propad struje omogućuje brže operacije na motorima a ovakvom recirkulacijom otpor  $R_s$  ne mora biti za velike snage što opet pojeftinjuje sustav.



Slika 40. Jedan H-most L298N

Vrijednost otpornika  $R_{SA}$  i  $R_{SB}$  se postavlja prema *Ohmovom zakonu* ovisno o struji koju motor može izdržati, odnosno koliko *L298N* može podržati. Spomenuto je da *L298N* radi sa strujama do 4A. To je ukupna struja čipa, dakle računa se 2A po fazi što je zadovoljavajuće za izabrani koračni motor koji je deklariran za tu struju ( 2A/faza ). Preporuka proizvođača je da se pri takvim motorima uzima otpor  $R_{SA}=R_{SB}=0.5\Omega$ , a nazivni napon na *L297*  $U_{ref}<1,2V$ . Dolje je prikazan primjer proračuna (20) za maksimalnu struju ( 2A/faza ) na namotajima te primjer naponskog dijelila [Slika 41] i proračuna otpora (21), (22):

$$I = \frac{U}{R} \rightarrow U = I \cdot R \quad (20)$$

$$U_{ref} = 2 \cdot 0.5 = 1 V$$

$$U_{izl} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{ul} \quad (21)$$

$$U_{izl} = U_{ref} = 1 V$$

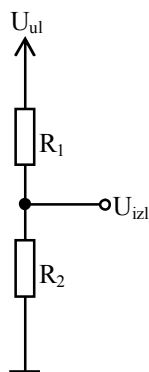
$$R_1 = 3.9 k\Omega \text{ (izbor)}$$

$$U_{ul} = 5 V$$

Iz jednadžbe (21) dobivamo sljedeći izraz iz kojeg računamo otpor  $R_2$ :

$$R_2 = \frac{R_1}{\frac{U_{ul}}{U_{izl}} - 1} = \frac{3900}{\frac{5}{1} - 1} \quad (22)$$

$$R_2 = 975 \, \Omega$$

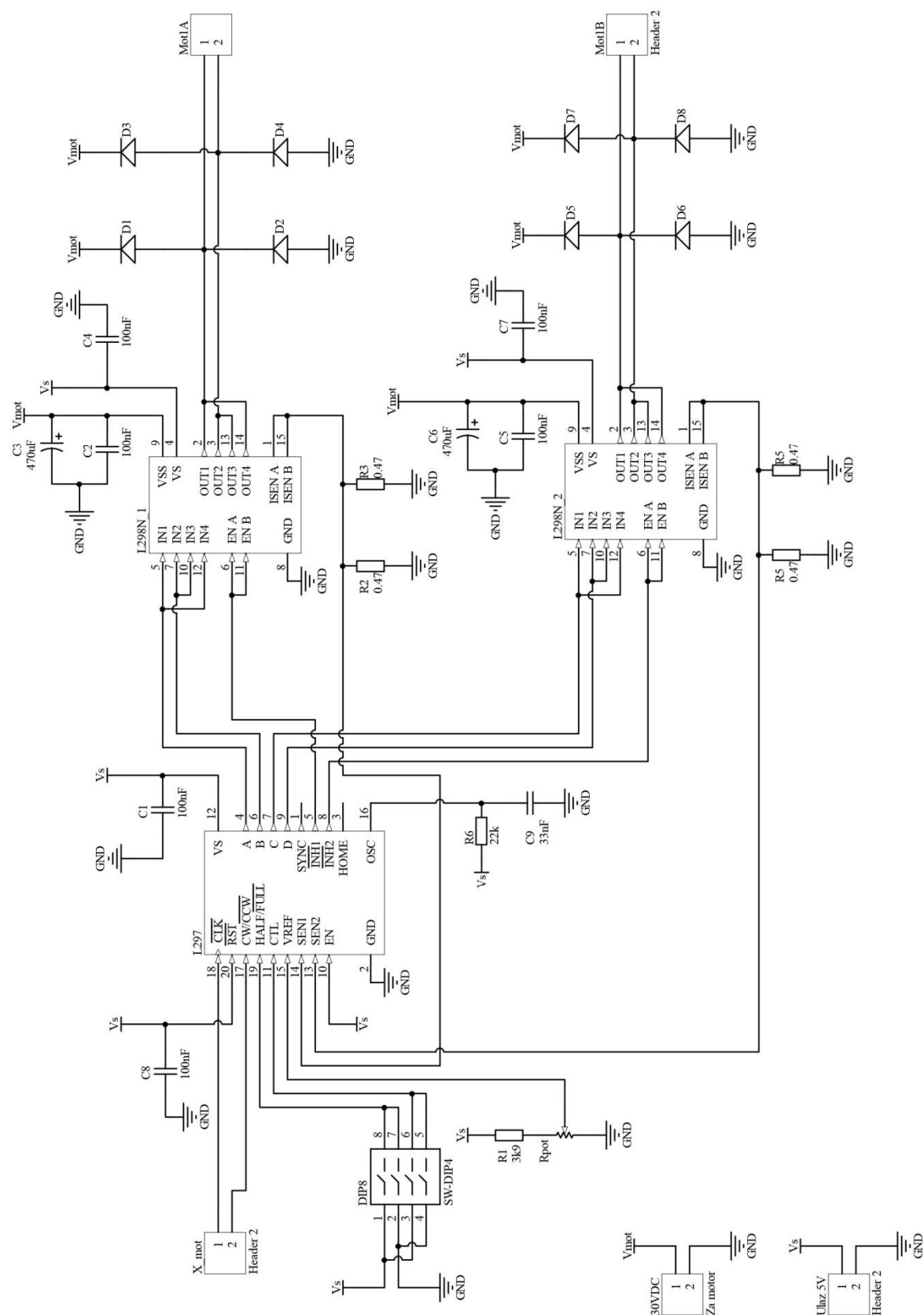


Slika 41. Naponsko dijelilo

$R_2$  je u praksi izveden kao trimer. *L298N* nudi mogućnost povećanja struje po fazi sa 2 A/faza na 3.5 A/faza, spajanjem dva *L298N* u paralelu. Za pravilan raspored struje na H – mostu tada se spaja prvi kanal sa četvrtim, te kanal dva sa kanalom tri. To bi značilo spoj IN1 sa IN4, IN2 sa IN3, OUT1 sa OUT4, OUT2 sa OUT3, te EnA sa EnB [Slika 42]. U [Tabela 8] su prikazane funkcije pinova prema blok dijagramu [Slika 39].

Tabela 8. Funkcije pinova L298N ( Multiwatt15 kućište )

PIN	IME	FUNKCIJA
1,15	SEN A, SEN B	Između tih pinova i uzemljenja spajaju se otpornici koji kontroliraju struju na namotajima.
2,3	OUT1, OUT2	Izlazi prvog mosta. Struja se kontrolira preko SEN A ( pin 1 )
4	Vs	Napajanje motora. Max 50V
5,7	IN1, IN2	Ulazi ( TTL kompatibilni ) za prvi most.
6,11	EnA, EnB	Ulazi sa uključivanje mostova. Kontrola propada struje.
8	GND	Uzemljenje.
9	Vss	Napajanje čipa. Max 7V.
10,12	IN3, IN4	Ulazi za drugi most.
13,14	OUT3, OUT4	Izlazi drugog mosta. Struja se kontrolira preko SEN B ( pin 15 ).



Slika 42. Električna shema povezivanja L297 sa dva paralelno spojena L298N

Sa gornje sheme vidi se paralelni spoj dva *L298N* kao i ostale preporučene komponente koje se koriste sa ovim čipovima. Za odabir načina rada motora i načina rada *choppera* iskorištena je 8DIP preklopka umjesto klasičnih „*jumpera*“. Korištene su brze diode koje rade sa strujama do 3A a prikazana shema je samo za jedan bipolarni motor.

### 3.3. Napajanje, zaštita paralelnog porta i senzori stroja

Oba ova čipa, *L297* i *L298N* napajaju se sa 5V dok motori zahtijevaju veće napone. Dvije razine napona ( 5V i napon motora ) potrebne su za opskrbljivanje energetskog dijela stroja. Iako se pokazalo da je *L298N* u praksi imun na manje šumove, padove napona i ostale karakteristike nekvalitetnog napajanja, upravljačka elektronika i motori zasigurno će biti pouzdaniji sa dužim životnim vijekom uz adekvatno napajanje sa stabiliziranim izlazom.

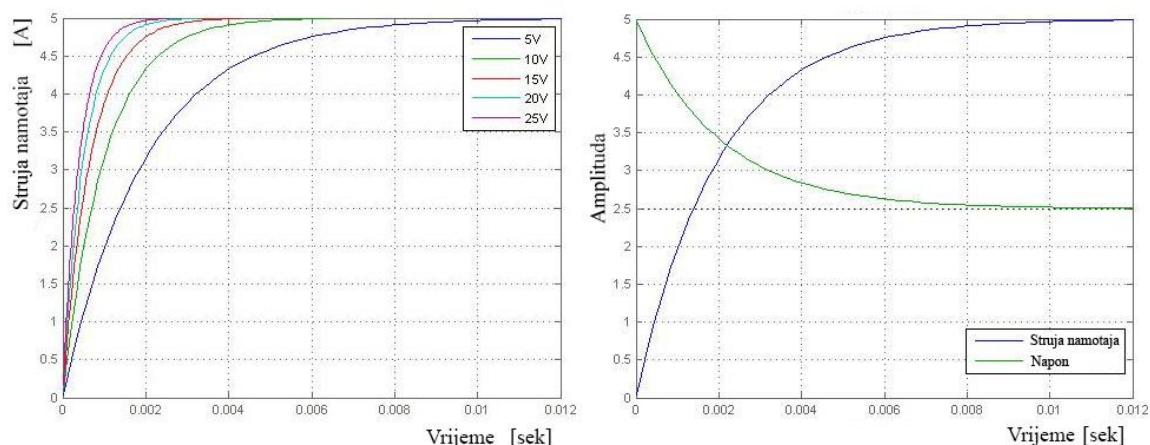
Najjednostavniji odabir napajanja je prema nazivnim strujama motora koje propisuje proizvođač. U paralelnom spoju ( pola namotaja se pobuđuje ) motor će preko kontrolera povući otprilike 2/3 nazivne vrijednosti struje, dok će pri serijskom spoju ( cijeli namotaj motora se koristi ) povući 1/3. To su približni podaci vodećih proizvođača *drivera* za koračne motore. Kod koračnih motora potrebno je razlikovati nazivni napon propisan na motoru, od operativnog napona koji je višestruko veći. Pojednostavljeno, nazivni napon propisan na motoru je napon motora u mirovanju ( eng. *steady state* ). Operativni napon je veći kako bi se u kraćem vremenu pobudili namotaji, odnosno u kraćem vremenu se dolazi do željene struje u namotajima. Matematički se to može pokazati na dolje prikazan način.

Za RL strujni krug, koji je analogan namotajima motora, vrijedi sljedeća relacija:

$$V = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \quad (23)$$

Prebacivanjem jednadžbe u *Laplaceovu* domenu može se prikazati prijelazna funkcija<sup>7</sup> i dinamika namotaja motora [Slika 43]. Vidljivo je smanjenje vremena odziva kako se povećava napon namotaja. Desna slika pokazuje primjer jedinične pobude namotaja sa 2.5V. Najveći dopušteni napon namotaja motora ovisi o njegovoj induktivnosti a može se izračunati prema jednadžbi (24) uz podatke za induktivnost gore navedenog modela motora.

<sup>7</sup> Prijelazna funkcija je odziv sustava na jediničnu pobudnu funkciju.



Slika 43. Dinamika namotaja motora ovisna o naponu [24]

Maksimalni napon namotaja motora 23HS6620:

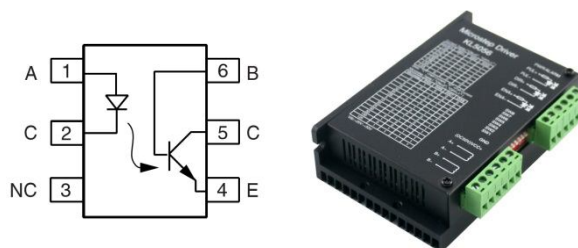
$$V_{max} = 32 \cdot \sqrt{L \text{ (mH)}} = 32 \cdot \sqrt{2.5}$$

$$V_{max} = 50.59 \text{ V} \approx 50 \text{ V}$$
(24)

Pozitivne posljedice povećanja napona, zbog bržeg odziva struje, jesu još veći operativni momenti i mehanička snaga stroja. Negativne strane se mogu javiti u obliku trzanja i pojave vibracija motora što može dovesti do preskakanja koraka. Podešavanje napona može biti delikatan posao koji zahtijeva dobro poznavanje motora i stroja općenito. Potrebno je prepoznati i razumjeti signale koje šalje stroj kako bi se on podesio na idealne parametre jer zbog nesavršenosti konstrukcije motora, upravljačke elektronike i napajanja nema savršene formule za podešavanje napona.

Hobisti za napajanje stolnih glodalica često koriste AT ili ATX napajanja od računala. Osim financijske prednosti, nude zadovoljavajući izvor napajanja. Spajanjem dva takva izvora u seriju može se dobiti 24V i do 9A struje ( ovisno o snazi napajanja ) što je idealno za tri koračna motora stolne glodalice. Kod ovakve improvizacije potrebno je prekinuti uzemljenje jednog od kućišta napajanja jer bi prilikom njihovog kontakta došlo do kratkog spoja. Također se ne preporuča sa istog izvora napajati obje naponske razine iako sama napajanja imaju interne zaštite. Na tržištu postoje specijalizirana napajanja velikih snaga namijenjena troosnim glodalicama koje se nude kod kupnje motora ili upravljačke elektronike [Slika 44]. Nisu financijski nedostupna ali su često upitne kvalitete.

Osim što je poželjno zaštititi motore, što je riješeno preko kombinacije *L297*, *L298N* i njihove interne strukture, dobro je zaštititi paralelni port računala preko kojeg će se upravljati motorima. Paralelni port ( LPT ) također radi sa TLL razinama napajanja: logička nula 0V, logička jedinica 5V. Računalo preko podatkovnih pinova LPT – a može dati ( eng. *source* ) približno 2.6mA, a primiti ( eng. *sink* ) do 24mA. U slučaju loše upravljačke elektronike ili krivog spoja računalo nije zaštićeno pa može doći do oštećenja matične ploče i ostalih komponenti računala. Rješenje je opto – izolacija računala od upravljačke elektronike motora. U praksi se takvi sklopovi nazivaju *Breakout Boards* ( BoB ) koji, kao što im i ime govori, služe kao veza između računala i elektronike motora te time štite samo računalo od vanjskih utjecaja. Glavni element BoB – a su opto – izolatori koje čini infracrvena LED – ica i fototranzistor. Najčešći izbor zbog dostupnosti i cijene je model 4N25 [Slika 44].



**Slika 44.** Opto – izolator 4N25 (lijevo), komercijalni *driver* (desno) [14]

Nekvalitetni BoB – ovi, tj. nekvalitetni opto – izolatori, mogu dovesti do preskakanja koraka motora pri većim brzinama ili se stroj uopće neće pokrenuti. Razlog su brzine prijenosa signala sa računala do upravljačke elektronike. To se može eliminirati bržim opto – izolacijskim elementima koji mogu raditi na većim frekvencijama. Nakon izrade prototipa BoB – a upravo je 4N25 zadavao probleme u radu zbog visokih frekvencija signala. Puno bolje rješenje su 6N137 i HCPL2630 serija opto – izolatora jer im je brzina do 10MBit/s.

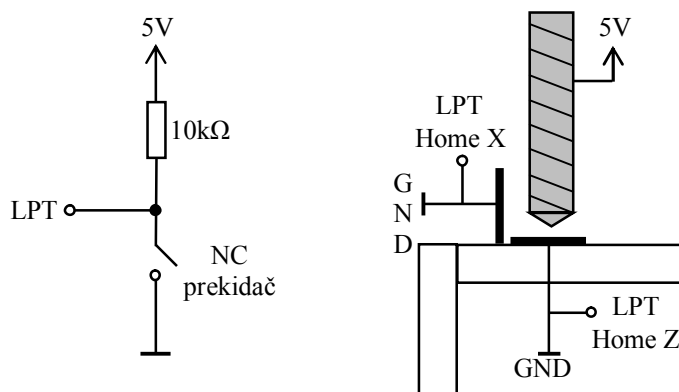
Osim zaštitne funkcije, na BoB – ovima su ulazi/izlazi senzora i ostala periferija stolnih glodalica. Tu spadaju senzori za referenciranje stroja u ishodište ( eng. *Home Position* ) i graničnici ( eng. *Limit Switches* ). Također, preko BoB – a se spajaju zaštitne sklopke, tzv. gljive ( eng. *Emergency Stop*, E - Stop ) ukoliko postoji programska podrška. Izvedba senzora za pozicioniranje i limite najčešće je mehanička iako su popularni još i optički preklopnici te *hall* – ovi senzori. Optički senzori rade na sličnom principu kao gore spomenuti opto – izolatori. Sastoje se od infracrvene diode i fototranzistora. Kada između njih dođe prepreka šalje se signal na LPT. *Hall* – ovi senzori reagiraju na magnetsko polje koje pobuđuje napon na izvodima. Često se implementiraju u sustave gdje su potrebne povratne informacije o

pozicioniranju, blizini nekog objekta, brzini, itd.. Mehanički senzori koji se najčešće koriste kod stolnih glodalica zbog svoje jednostavnosti izvedeni su preko mikroprekidača. Na donjoj slici [Slika 45] prikazan je presjek jedne izvedbe mikroprekidača. Karakteristika mikroprekidača su tri ( većinom, ima i sa 2 ) izvoda: NO ( eng. *Normally Open* ), NC ( *Normally Closed* ) i uzemljenje ili zajednički izvod ( eng. *Common* ). Praktično je što se može više mikroprekidača spojiti u seriju ili paralelu pa je potrebno manje pinova paralelnog porta . To dolazi do izražaja kod uporabe mikroprekidača kao graničnika gdje se svih šest ( na svaku os dva ) prekidača spoji u seriju te koriste samo jedan ulaz paralelnoga porta [Slika 47]. Većina programa nudi mogućnost podešavanja hoće li aktivni signal na paralelnome portu biti visoki ili niski. To će obraditi u kasnijem odjeljku.



Slika 45. Optički senzor, Hall – ov senzor i presjek mikroprekidača [23]

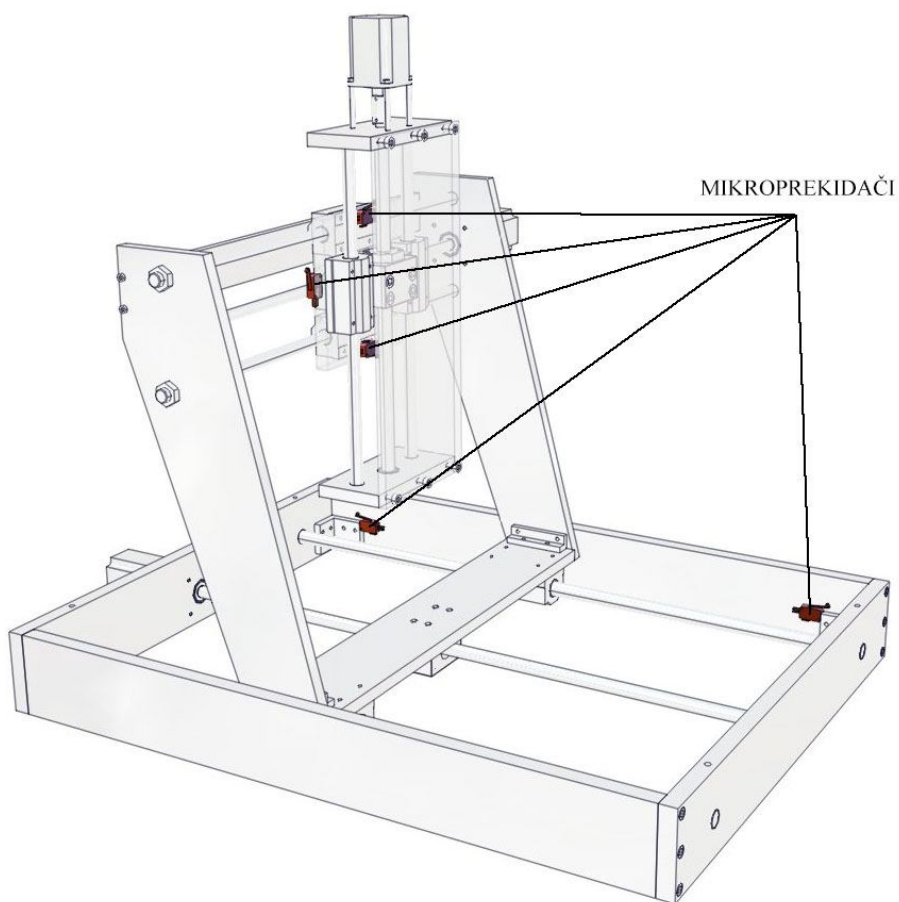
Mikroprekidači u funkciji graničnika kod većina strojeva nisu nužni jer se programski može podesiti radno područje stroja. Tada se govori o meko postavljenim granicama ( eng. *Soft Limits* ) koji nude nekoliko opcija zaustavljanja stroja. Izvedba sa mikroprekidačima, ili tvrdi limiti, ipak se još uvijek koriste radi sigurnosti i fleksibilnosti kod izbora programske podrške. Ulazi senzora i ostalih signala na paralelni port prikazan je na donjoj shemi [Slika 46]. Aktivan je visoki signal na ulazu u paralelni port, a korišten je spoj normalno zatvorenog ( NC ) prekidača.



Slika 46. Shema spoja mikroprekidača (lijevo), referenciranje sa alatom (desno)

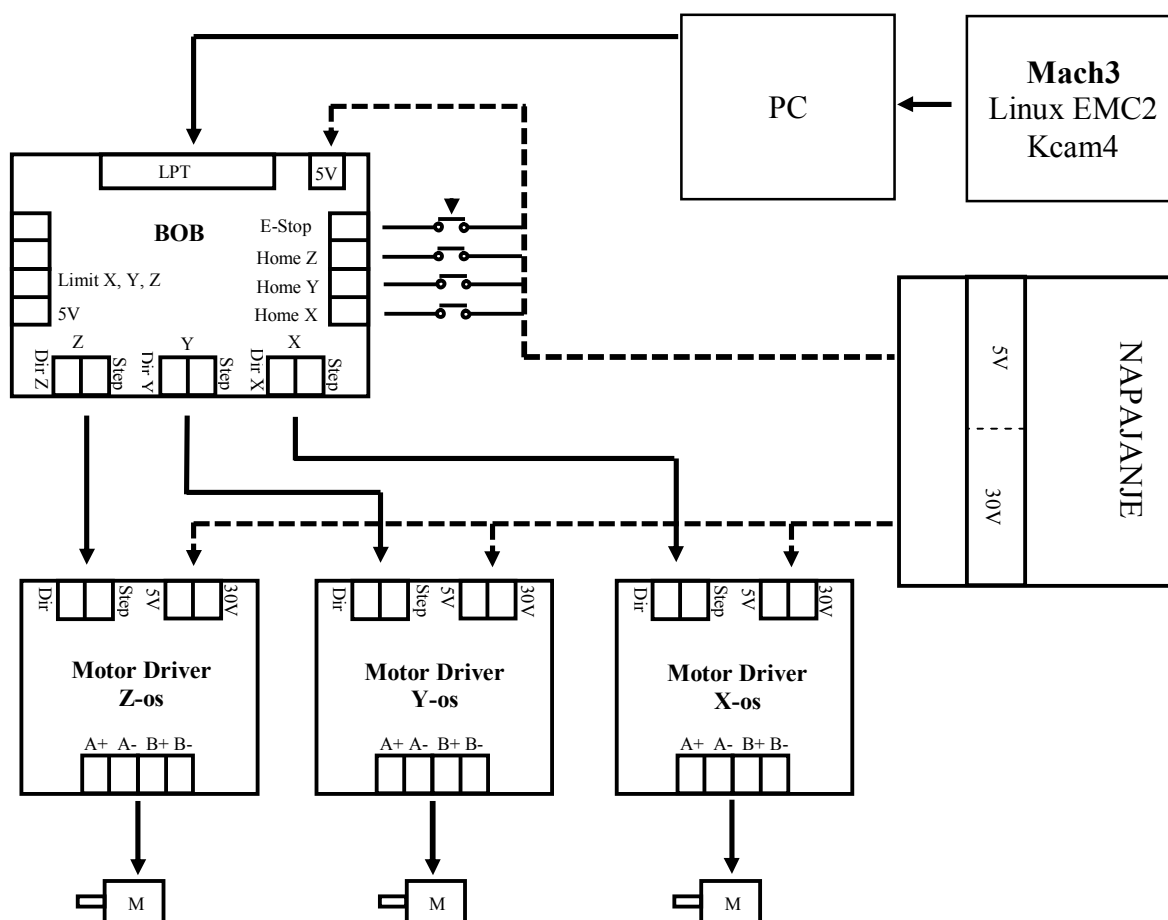


Za postavljanje stroja u ishodište uvijek se preporuča korištenje senzora jer znatno olakšavaju kasniji rad. Potrebna su tri mikroprekidača za referenciranje stroja na nulu po svim osima. Jedno od mogućih rješenja postavljanja stroja u ishodište jest i preko samog reznog alata tako da se rezna oštrica postavi na jedan pol napajanja, a granice ( metalne pločice ) na drugi. Prilikom njihovog kontakta zatvara se strujni krug što se koristi kao ulazni signal na LPT [Slika 46]. Sveukupno za definiranje ishodišta i granica rada stroja potrebno je dakle devet mikroprekidača ali samo četiri pinova paralelnoga porta. U kasnijem poglavlju opisat će se njihovo podešavanje unutar programa.



**Slika 47. Smještaj mikroprekidača na stroj (samo limiti)**

U ovom odjeljku opisan je energetski dio stolne glodalice. Opisani su koračni motori te potrebna elektronika za njihovo pokretanje, zaštitni sklopovi i senzori. Pojednostavljen shematski prikaz je na donjoj slici [Slika 48]. Kompletne elektroničke sheme, nacrti tiskanih pločica i ostala dokumentacija nalazi se u prilogu rada.



Slika 48. Pojednostavljeni shematski prikaz energetskega dijela stolne glodalice

Sa sheme [Slika 48] je vidljiva ideja projektiranja energetskega dijela stroja. Napajanje će u praksi biti dva odvojena izvora za svaku razina ( 5V i 24V ). Ideja je da se iskoristi 5V sa računala sa jedne strane opto – izolatora a dva ATX napajanja ( 24V, 5V ) za ostalu elektroniku. Razvit će se tri identične tiskane pločice za upravljanje motorima ( *Motor Driver X, Y, Z* ) sa *L297/L298N* kombinacijom. Na BoB – u će biti redne stezaljke za ulaze sa senzora i izlaze signala za rad motora. Također, na BoB – u se nalaze opto - izolacijski čipovi HCPL2360 radi zaštite računala.

## 4. PROGRAMSKA PODRŠKA

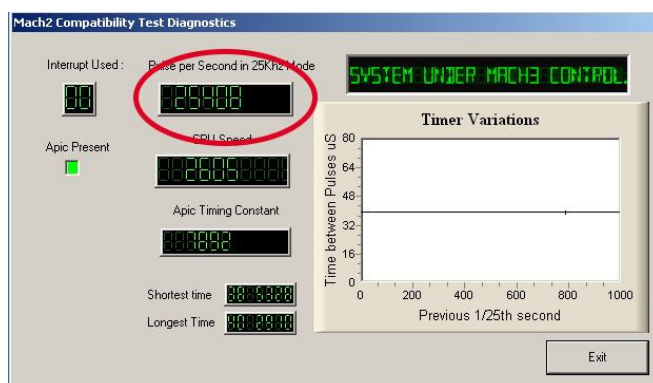
U ovom poglavlju obradit će se programski alati ( CAD/CAM ) za kontrolu stroja. Najviše pažnje posvetit će se najraširenijem programu, *Mach3*. Za spomenuti program će se objasniti početna podešavanja te glavne funkcije i mogućnosti.

### 4.1. Mach3

*Mach3* programski paket najpoznatiji je alata koji svako računalo sa paralelnim ili serijskom portom pretvara u kontroler CNC strojeva. Proizvođač je tvrtka *Artsoft* koja ima preko deset godina iskustva u radu sa CNC strojevima. Idealna minimalna konfiguracija računala za pokretanja *Mach3* programa je procesor od 1GHz sa rezolucijom od 1024x768 i WinXP ili Win2000 operativnim sustavom. *Mach3* nije besplatan alat ali nudi besplatnu inačicu koja se može skinuti sa službenih stranica a ima nekoliko ograničenja. Osnovne karakteristike *Mach3* alata:

- kontrola do 6 osi,
- vizualni zaslon G - koda,
- kontrola brzine vrtnje reznog alata,
- višestruka relejna kontrola,
- ručno generiranje impulsa ( brzina i vrijeme trajanja ),
- unos DXF, BMP, JPG i HPGL formata preko *LazyCam*-a,
- generiranje G – koda preko dodatnih alata i čarobnjaka, itd.

Nakon klasične instalacije prilikom koje se nude mogućnosti instalacije dodatnih alata ( npr. *LazyCam* ) i kreiranja profila, obavezno slijedi reset računala. Na to se uvijek stavlja naglasak jer su česte poteškoće u kasnijem radu ako se taj korak preskoči. Razlog tome je što se u operativni sustav mora integrirati dio alata koji je zadužen za preciznu komunikaciju preko portova računala, a poznato je da Windows operativni sustavi ne daju pristup svim razinama računala, pogotovo ne nižim. Kada je instalacija i reset računala proveden moguće je pokrenuti *DriverTest.exe* aplikaciju iz mape *Mach3* koja nam daje status o uspješnosti instalacije i kompatibilnost sa računalom. Bitan je parametar *Pulses per Seconds* ( PPS ) koji bi se trebao kretati blizu 25kHz [Slika 49]. *Mach3* paket osim programa za glodanje *Mach3Mill* kod instalacije snima verziju programa za plazma rezanje i tokarenje.

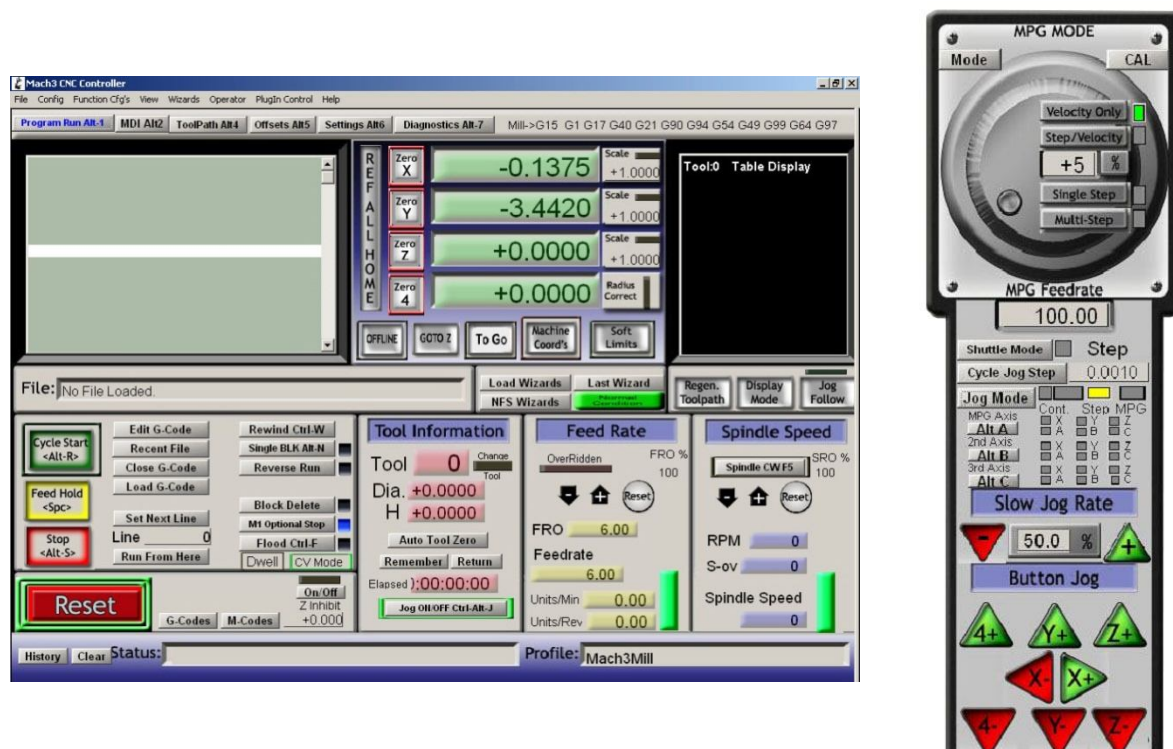


Slika 49. Test kompatibilnosti računala sa *Mach3* alatom

Pokretanjem *Mach3Mill* – a najprije se podešava način komunikacije računala te se izabire *Normal Printer port Operation* nakon čega se pojavi početni *Mach3Mill* prozor [Slika 50]. Osnovni objekti i podprozori mogu se podijeliti na:

- gumbe ( reset, stop, feed hold, ... ),
- digitalne pokazatelje ili DRO ( eng. *Digital Readouts* ) – svi prozorčići sa numeričkim vrijednostima,
- LED indikatore različitih veličina i boja,
- podprozor za prikaz G – koda,
- podprozor za prikaz putanje alata,
- liniju za ručni unos podataka, MDI ( eng. *Manual Data Input* )

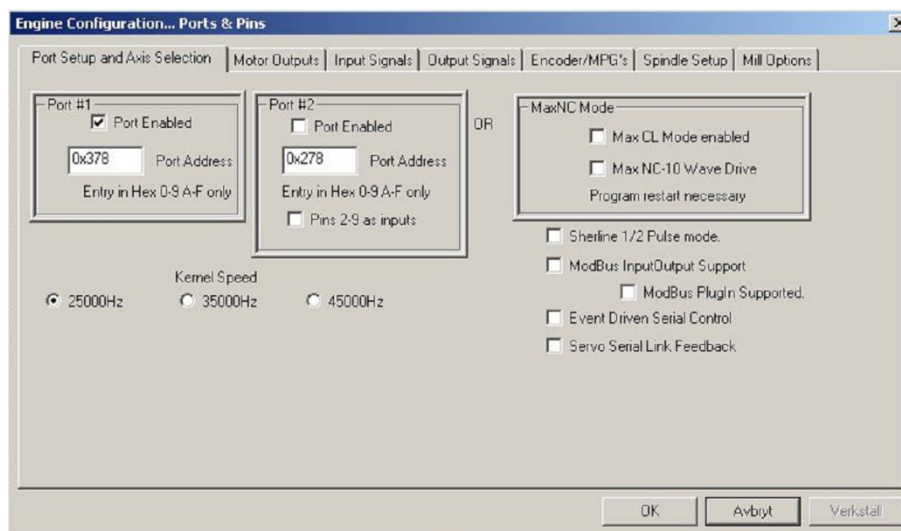
Glavni prozor *Mach3* se može promijeniti ovisno o načinu rada stroja i prioritetu podataka koji su bitni u radu. Ti prozori se nalaze ispod glavnog izbornika a prilikom startanja programa upaljen je *Program Run* prozor. Postoji još *MDI*, *ToolPath*, *Offset*, *Settings* i *Diagnostics* prozori koji se mogu otvarati kraticama na tipkovnici. Prilikom rada stroja praktično je minimizirati korištenje miša i upravljati strojem preko tipkovnice i kratica naredbi. Jedna od bitnijih kratica je tipka *Tab* kojom se otvara novi prozor za kontrolu gibanja motora ( eng. *Jog Control* ) [Slika 50]. Strelicama gore/dolje i lijevo/desno pokreću se X i Y os, PgUp/PgDn tipkama kontrolira se Z os. U ovom prozoru se mogu izabrati različiti načini gibanja motora ( kontinuirano, koračno ) kao i brzine gibanja. Spajanjem *Joysticka* ili neke druge slične periferije na računalo, *Mach3* nudi kontrolu stroja preko tih dodataka. *Mach3* nudi pregršt opcija koje u ovom radu neće biti spomenute. U kasnijem poglavlju će se na praktičnom primjeru pokazati konkretan postupak obrade.



Slika 50. Početni prozor Mach-a i Jog Control prozor

#### 4.1.1. Početne postavke programa

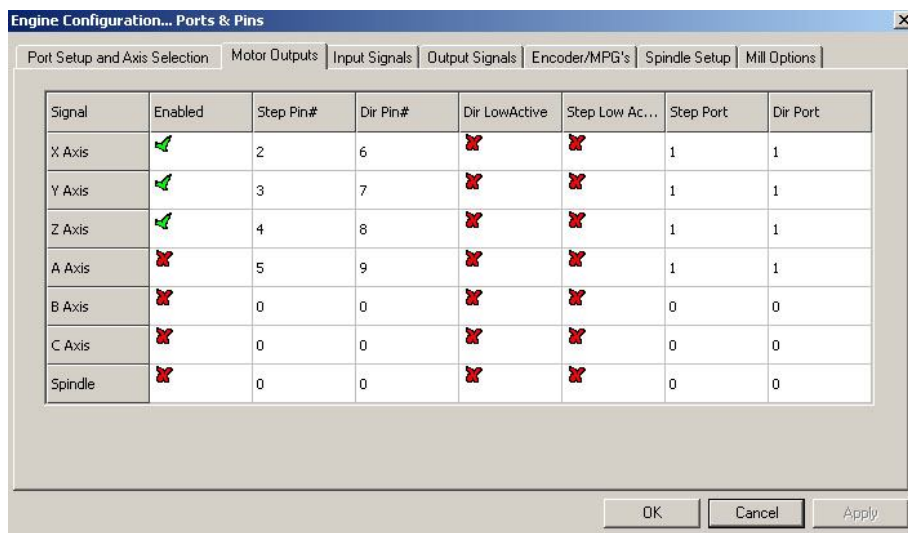
Prvi korak pri podešavanju programa je aktiviranje metričkog sustava jedinica iz *Config* izbornika ( *Config/Select Native Units* ). Iz istog izbornika izabire se podopcija *Ports and Pins* gdje se podešavaju ulazi/izlazi LPT – a kao i sama njegova adresa [Slika 51].



Slika 51. Podešavanje paralelnog porta

U tabu *Port Setup and Axis Selection* podešavaju se adrese paralelnog i serijskog porta. U većini slučajeva je za upravljanje stolnom glodalicom dostatan samo paralelni port pa će se

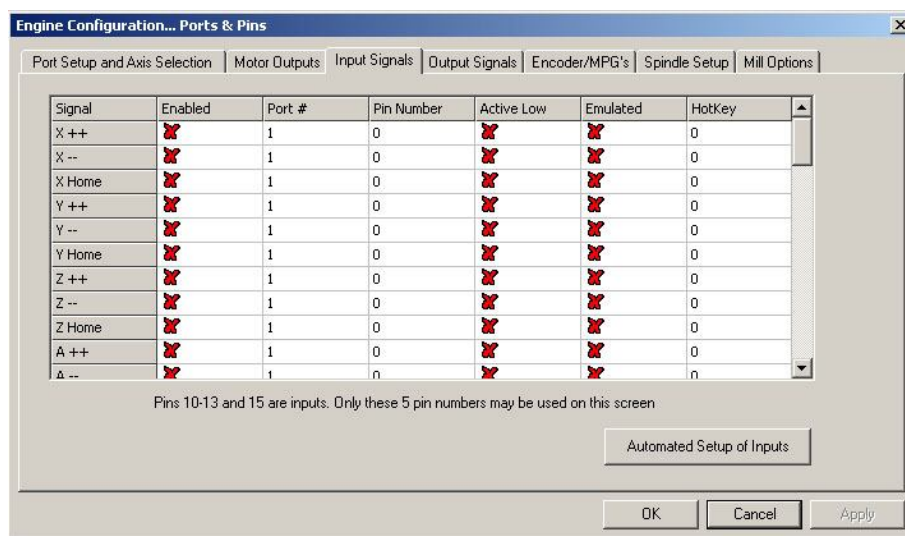
samo on uključiti ( *Port Enabled* ). Bitno je još provjeriti samu adresu porta odlaskom u *Device Manager* operativnog sustava gdje se desnim klikom miša na *Printer Port* ( LPT ) i otvaranjem njegovih svojstva ( *Properties* ) može u jednom od tabova ( *Resources* ) novootvorenog prozora pronaći adresu porta. Uobičajena adresa kod stolnih računala je 0x378koja je već postavljena u *Mach3* programu. Sljedeće na redu je izbor brzine sustava ( *Kernel Speed* ) – *Mach3* može raditi u rasponu od 25kHz do 100kHz ovisno o konfiguraciji računala. Brža frekvencija ( 35kHz ) se može izabrati kod računala sa procesorima koji rade na 1GHz i više. Veće brzine su potrebne kod vretena koja imaju mali korak i kod korištenja upravljačke elektronike koja nudi mogućnost mikrokoraka motora. Sljedeći tab, *Motor Outputs*, definira izlaze sa LPT – a na motore [Slika 52]. To su u prethodnom poglavlju spomenuti signali za brzinu ( *Step* ) i smjer vrtnje motora ( *Dir* ). Za svaki motor postave se pinovi LPT – a tih dvaju signala na koje je povezana upravljačka elektronika motora, tj. BoB. Potrebno je još podesiti hoće li aktivni signal biti visoki ili niski. Većinom su aktivni visoki signali pa se taj stupac ( *Step ActiveLow*, *Dir ActiveLow* ) ne mora mijenjati iako postoje komercijalni *driveri* koji koriste niske signale i tada se to naglasi. Uz poznavanje upravljačke elektronike postupak je vrlo jednostavan i intuitivan. Vidljivo je da se može upravljati sa šest osi i brzinom obrade ( *Spindle* ) ukoliko se implementira odgovarajući motor. Vrijednosti porta za svaki signal se ne mijenjaju ako se koristi port 1, tj. LPT.



Slika 52. Podešavanje motora u *Mach3*

Nakon postavljanja signala motora prelazi se na podešavanja ulaza ( *Input Signals* ) [Slika 53]. Tu spadaju svi senzori i zaštitna elektronika stroja: mikroprekidači u službi graničnika ili pozicioniranja u ishodište, E – Stop, itd.. Postupak podešavanja je identičan kao i kod izlaznih

signala za motore. Postavljaju se pinovi i port za svaki pojedini senzor te aktivni signal. Polje *Emulated*, kada se aktivira, ignorira vrijednost pinova, portova te aktivni signal i prati *HotKey* vrijednost koja aktivira određeni senzor. Koristi se u kombinaciji sa emulatorom tipkovnice. Ovime su pokrivenne osnovne postavke stolne glodalice. *Mach3* nudi još postavljanje izlaznih signala, enkodera i generatora impulsa, preciznu kontrolu alata obrade ( preko PWM - a ), detaljne postavke glodanja, itd.. Nakon što su se podesili svi pinovi potrebni za rad, u početnom prozoru *Mach3* izabire se tab *Diagnostics* ( Alt+7 ) gdje je dan praktičan pregled svih ulaza/izlaza sa ostalim postavkama stroja.



Slika 53. Definiranje *Mach3* ulaza

Osim preko mikroprekidača i ostalih vanjskih senzora, radne granice stroja mogu se podesiti programski, što je ranije u energetsom dijelu teksta napomenuto. To se tada nazivaju mekim granicama ( eng. *Soft Limits* ) a može ih se podesiti u izborniku *Config/HomeLimits*. Jednostavnim unosom maksimalne i minimalne vrijednosti pojedinih osi odredi se granica uz mogućnost dodatnih karakteristika zaustavljanja i brzina.

#### 4.1.2. Podešavanje motora

Za stabilan i miran rad motora, kao i stroja u cjelini, potrebno je ispravno podesiti komunikaciju i način rada motora. *Mach3* nudi precizno namještanja rada motora čime se omogućuje upotreba motora raznih karakteristika koje nekad znaju odstupati od propisanih vrijednosti. Također, zbog opcija koje nudi *Mach3*, moguće je koristiti širok raspon upravljačke elektronike jer se programski može podesiti „idealni“ rad. Dinamika motora podešava se u izborniku *Conf/Motor Tuning* [Slika 54]. Prije toga potrebno je provesti



jednostavan proračun da bi *Mach3* mogao definirati mogućnosti i opseg rada motora. Poznati su sljedeći podaci o motorima i vretenu:

- korak vretena,  $P=5\text{mm}$
- jedan korak motora,  $p_M=1.8^\circ$

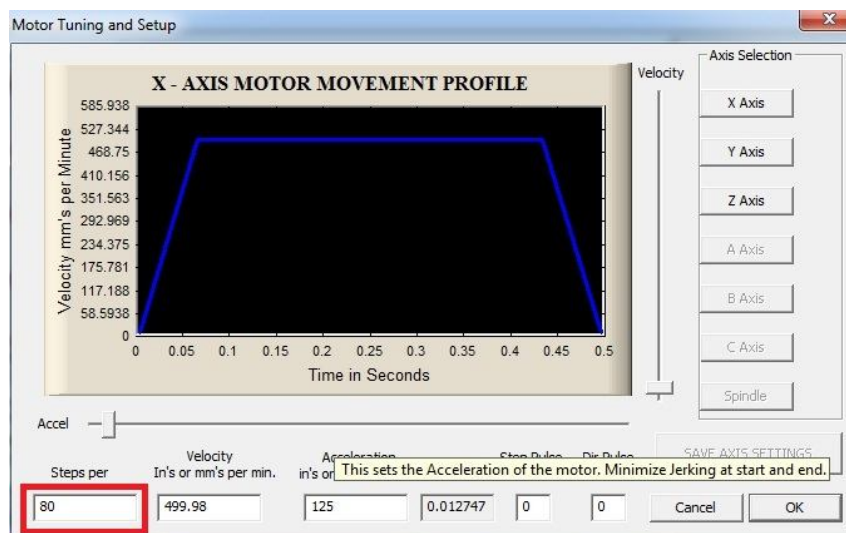
Broj koraka motora za puni okret:

$$P_M = \frac{360^\circ}{p_M} = \frac{360^\circ}{1.8^\circ} = 200 \quad (25)$$

$$P_M = 200 \text{ koraka/okretaju}$$

Kako je za jedan korak motora potreban jedan impuls, a motor je direktno preko spojke vezan na vreteno, za pokretanje motora u načinu rada sa punim korakom, potrebno je generirati 200 impulsa za puni krug. Slanjem tih 200 impulsa, motor i matica vretena naprave puno krug, dobiva se linearni pomak od 5mm. U *Mach3* potrebno je upisati ( Slika 54 lijevo dolje ) korake po jedinici duljine, tj. korak/mm ( impuls/mm ). To se dobiva relacijom:

$$KPMM = \frac{P_M}{P} = \frac{200}{5} = 40 \quad (26)$$



Slika 54. Postavke motora

Iznos iz jednadžbe (26) se upisuje u lijevo donje polje otvorenog prozora, ali samo u slučaju rada motora u punom koraku ( niski signal na pinu 19 čipa *L297* ). Ako će motor raditi u



polu– koraku ( visoki signal na pinu 19 čipa L297 ), broj impulsa za puni okret motora se udvostručuje:

$$P_{MHS} = P_M \cdot 2 = 200 \cdot 2 = 400 \text{ impulsa/okret} \quad (27)$$

Mijenja se i broj impulsa za pomak od jednog milimetra:

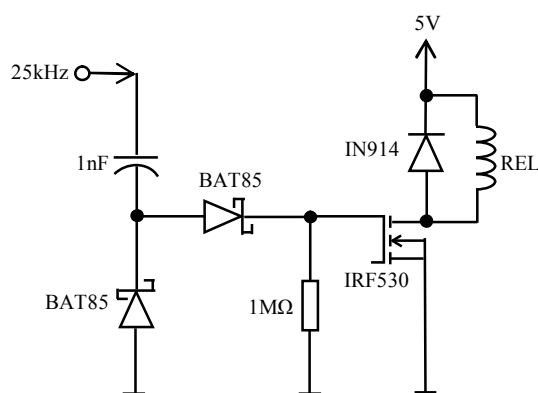
$$KPMM = \frac{P_{MHS}}{P} = \frac{400}{5} = 80 \quad (28)$$

Definiranjem broja impulsa mijenjaju se maksimalne vrijednosti brzine i akceleracije motora. Pri brzini sustava od 25kHz, najveća teoretska brzina u polu – koraku je 18750mm/min a punom koraku je 37500mm/min. To se može provjeriti pomakom vertikalnog klizača *Velocity* u najvišu točku. Željena akceleracija se mijenja horizontalnim klizačem. Ovisno o položaju klizača mijenja se dijagram u prozoru. Nema pravila za vrijednosti brzina i akceleracije pa se one izabiru postepeno u koracima. Preporuča se da početna brzina kod testiranja mogućnosti motora ne prelazi 20% teoretske brzine iako se i ta vrijednost često spominje kao previsoka točka polazišta. Ako se izaberu prevelike brzine i akceleracije motori se neće pokrenuti ili će prilikom rada vibrirati. Preostala dva polja, *Step Pulse* i *Dir Pulse*, definiraju trajanje impulsa. Kod slabije upravljačke elektronike ( ili BoB – a ) mogu se javiti problemi sa motorima u obliku preskakanja koraka ili vibracija pa je jedna od mogućnosti povećanje trajanja ovih impulsa u ponuđenom rasponu. Druga opcija je provjera napona na paralelnom portu.

#### 4.1.3. *Charge Pump*

Kod pokretanja računala nikad se sa sigurnošću ne mogu pretpostaviti stanja na pinovima paralelnoga porta. Ako je stroj tokom paljenja ili resetiranja računala također upaljen i povezan sa računalom, kao posljedica se mogu dogoditi neželjena gibanja koja pak mogu dovesti do oštećenja stroja ili ozljeda osoba u blizini. Da bi se to spriječilo većina programa koja preko LPT – a komunicira sa strojem ima mehanizme zaštite. Često se oni nazivaju *Charge Pump*, pa je tako slučaj i sa *Mach* – om . Princip rada im je jednostavan: kada je program pokrenut, na prethodno postavljenom pinu se generira pravokutni signal frekvencije 12.5kHz. Kada nema tog signala onemogućeno je komuniciranje sa upravljačkom elektronikom. To se postiže jednostavnom elektroničkom shemom sa slike

[Slika 55]. Shemu na svojim stranicama preporučuje i Artsoft. Glavni elementi su dvije *shottky* diode, MOSFET tranzistor i relej kojim se kontrolira upravljačka elektronika.



Slika 55. Charge Pump [25]

Pinovi na paralelnom portu se postavljaju u gore spomenutom izborniku *Ports and Pins* pod tabom *Outputs Signals* i nazivom *Charge Pump*. Ovu funkciju je moguće podesiti da radi u ovisnosti o aktivnosti *Reset* gumba ili neovisno o tom ulazu.

## 4.2. EMC2 i KCam4

Osim gore spomenutog *Mach3* alata, popularni su još EMC2 i KCam programi za upravljanje stolnim glodalamicama preko paralelnog porta računala. KCam je dvostruku jeftiniji od *Mach3* dok je EMC2 besplatni program namijenjen radu u Linux operativnom sustavu.

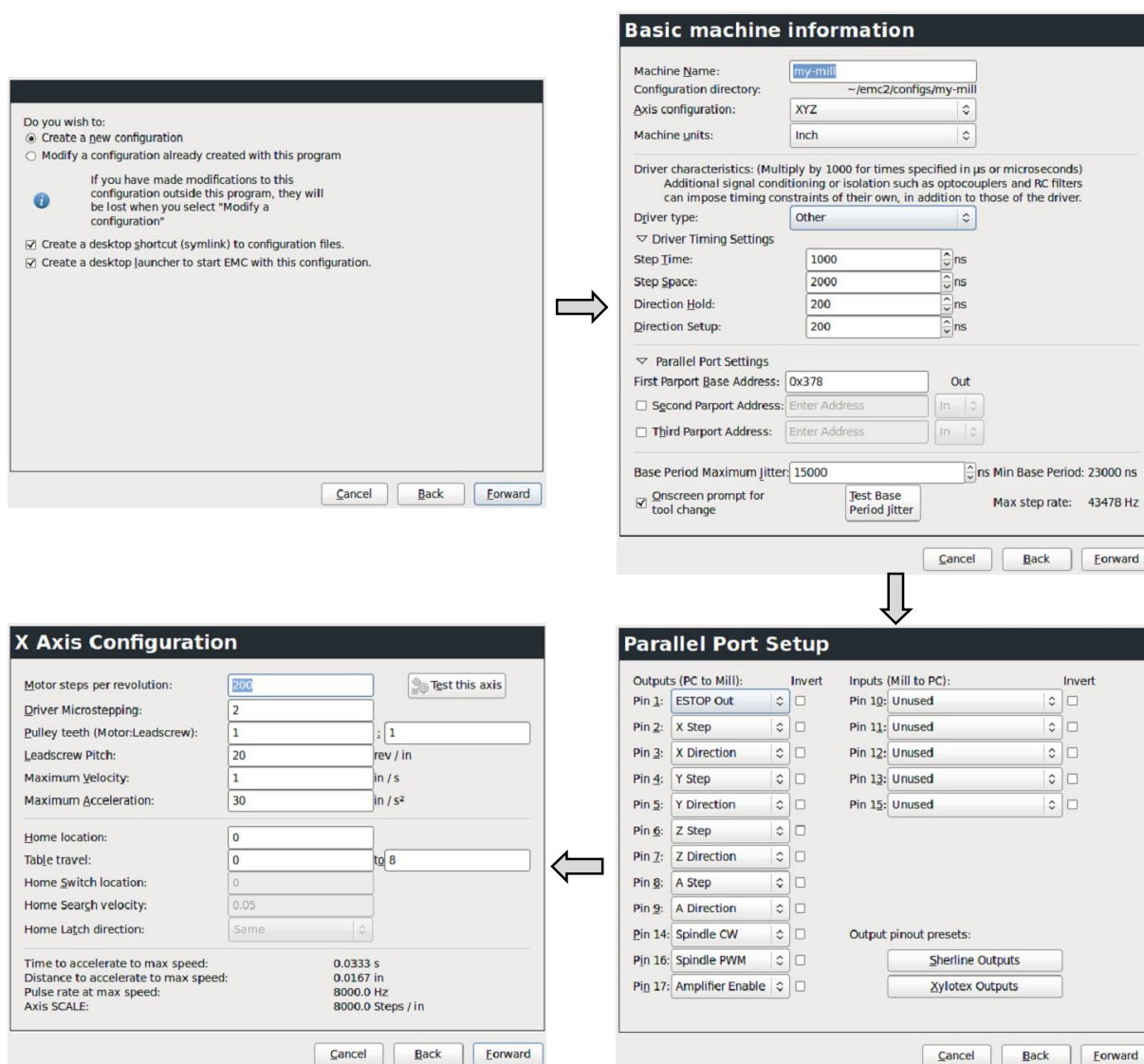
### 4.2.1. LinuxCNC (EMC2)

*LinuxCNC*, tj. *EMC* (eng. *Enhanced Machine Control*), je trenutno u verziji 2.5 izdanoj 2012. god.. *EMC* radi na Ubuntu distribuciji Linuxa što je vrlo pozitivna stvar zbog sve veće popularnosti ove verzije Linuxa. Ubuntu dobiva sve više korisnika zbog dobrih performansa i odlične korisničke podrške koja ga je približila širim masama. Trenutno *EMC* radi stabilno sa Ubuntu 10.4 verzijom iako je u konstantnom razvoju te se predviđa implementacija na novo Unity sučelje koje Ubuntu preferira posljednjih godina. Prednosti koje Linux operativni sustavi imaju nad klasičnim Windows – ima se ističu i kao prednost *EMC* – a nad konkurencijom:

- cijena,
- fleksibilnost i kontrola,

- manji hardverski zahtjevi,
- kompatibilnost

Nije potrebno iskustvo u radu sa Linux – om kako bi se uspješno savladao rad u *EMC* – u jer je program intuitivan i sličan ostalim programima iste namjene. Ipak, potrebno je nešto više znanja o samoj stolnoj glodalici, o mehanici i upravljačkoj elektronici. Ako je riječ o samogradnji onda to nije problem, ali ako je riječ o kupljenom proizvodu potrebno je poznavati podatke o kugličnim vretenima, motorima i njihovoj upravljačkoj elektronici. *EMC* je najlakše podesiti preko *Stepper Configuration Wizard* aplikacije koja se nalazi u *LinuxCNC* izborniku nakon instalacije. Nakon otvaranja prvog prozora [Slika 56] odabire se stvaranje novog profila nakon čega slijede koraci koji su analogni postavkama u *Mach3* programu.



Slika 56. Stepper Configuration Wizard [13]

Tim postupkom definiraju se sve karakteristike stroja, od početnih postavki jedinica do detaljnih svojstva motora za svaku os. Kod definiranja osi, klikom na *Test this axis*, otvara se novi prozor koji je predviđen za podešavanje željenih karakteristika motora ( brzina, ubrzanje ). Kao i kod *Mach3* alata postoji mogućnost kontrole brzine vrtnje obradnog alata i dodatne napredne opcije. Kod postavljanja početnih parametara preporuča se testiranje računala ( *Test Base Period Jitter* ) [Slika 57]. Time se provjerava latencija, tj. vrijeme reakcije računala – vrijeme potrebno da računalo zaustavi trenutne procese i reagira na eksterni zahtjev.

Let this test run for a few minutes, then note the maximum jitter. You will use it while configuring emc2.

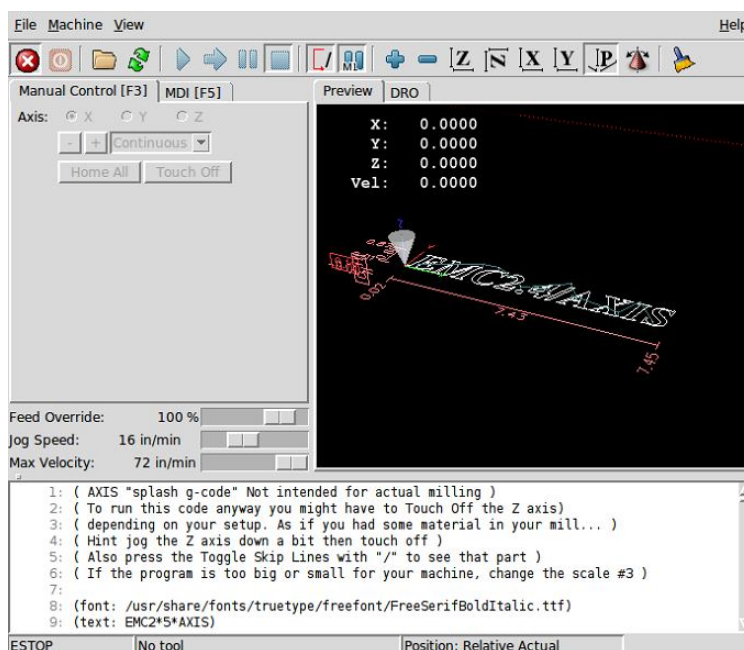
While the test is running, you should "abuse" the computer. Move windows around on the screen. Surf the web. Copy some large files around on the disk. Play some music. Run an OpenGL program such as glxgears. The idea is to put the PC through its paces while the latency test checks to see what the worst case numbers are.

	Max Interval (ns)	Max Jitter (ns)	Last interval (ns)
Servo thread (1.0ms):	1001089	<b>5929</b>	995302
Base thread (25.0µs):	33954	<b>9075</b>	24843

Reset Statistics

Slika 57. Latency test u EMC – u [13]

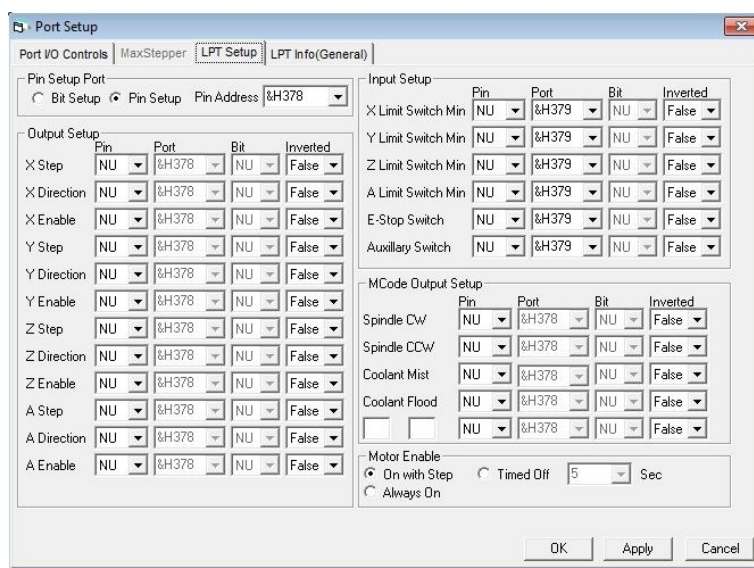
Ako je vrijednost *Max Jitter* manja od 15 – 20µs računalo će uredno obavljati funkciju kontrolera stolne glodalice. *EMC2* je izvrsna alternativa za *Mach3*, nudi odličnu podršku i funkcije ali mu ipak nedostaje transparentnosti i tehničke podrške. Upravo zbog tih nedostataka nije još toliko raširen iako je besplatan. Po mogućnostima i performansama vrlo je blizu *Mach3* alatu.



Slika 58. LinuxCNC ( EMC2 ) [13]

#### 4.2.2. KCam4

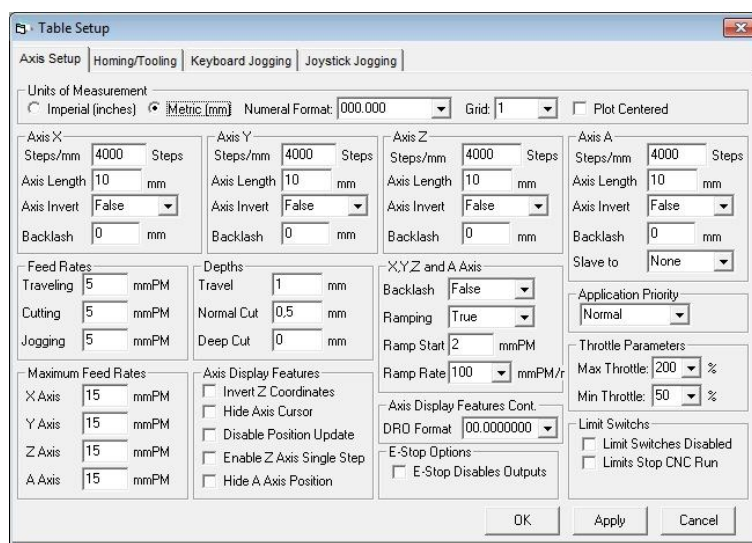
Sljedeća popularna alternativa za upravljanje stolnom glodalicom plod je tvrtke *KellyWare*, naziva *KCam*. Posljednja verzija *KCam4* izdana je 2012., a kao i ostale prijašnje verzije cilja na tržište stolnih glodalica/rezačica/tokarilica. *KCam* tokom izrade ovog rada nije testiran u praksi sa strojem ( instalirana i isprobana Demo verzija ) zbog nedostatka vremena ali i dojma da ne opravdava reputaciju i uloženi novac. Ako se uspoređuje sa *EMC* – om ne nudi ništa više mogućnosti a transparentnost i grafičko sučelje također ne fasciniraju ( iako to nije od velikog značenja obzirom na svrhu ovog alata ). *KCam* podržava sve Windows operativne sustave od Win98 do Win7. Ne nudi podešavanje stroja i parametara sa „čarobnjacima“ kao *Mach3* i *EMC* ali ono nije komplicirano. Nakon instalacije programa prvo se izabire izbornik */Machine/Create New MachineSetup* gdje se daje naziv postavkama stroja i spremi ih se u željenu mapu za kasniji rad. Zatim slijedi postavljanje adrese ( tab *Port I/O Controls* ) i pinova ( tab *LPT Setup* ) paralelnog porta preko izbornika */Setup/Port Setup* [Slika 59].



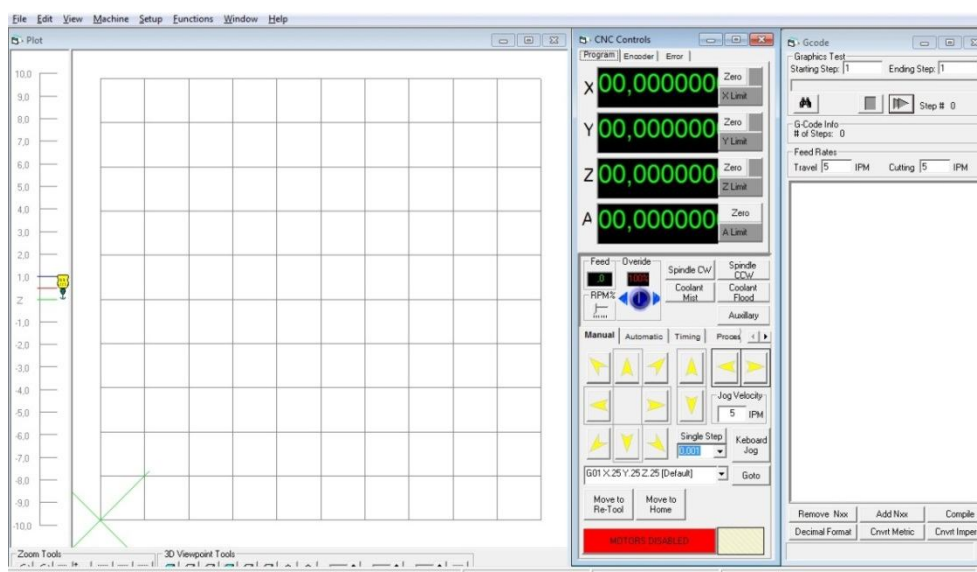
Slika 59. KCam4 postavke zadaće pinova paralelnog porta

Kao i u prethodnim alatima ovdje se postavljaju funkcije određenih pinova paralelnog porta, definiraju se ulazi sa senzora i ostala ulazno/izlazna periferija. Nakon toga slijedi postavljanje dinamike motora poznavajući njegove podatke kao i one od vretena [Slika 60]. Opet se može vidjeti da je postupak analogan kod sva tri spomenuta alata. Prilikom testiranja *KCam* – a na Win7 OS – u alat je djelovao tromo i nepouzdan te se nekoliko navrata ugasio. Sam *KellyWare* na svojim stranicama preporuča dosta jaču konfiguraciju računala nego što je to

kod konkurencije. Unatoč subjektivnim kritikama i nezadovoljstvu činjenica je da *KCam* ostaje vrlo zapažen alat među hobistima ali i profesionalcima CNC struke.



Slika 60. *KCam4* postavke dinamike motora

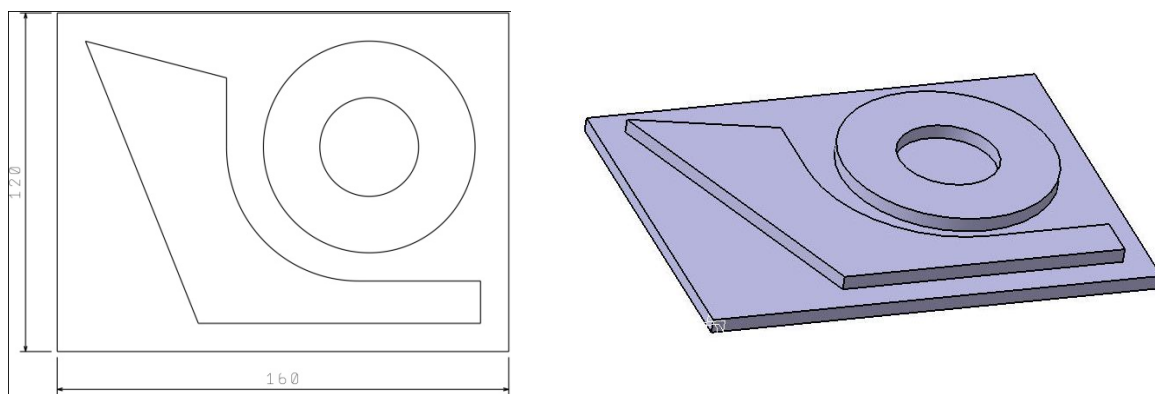


Slika 61. *KCam4* početno sučelje

## 5. PRIMJER GLODANJA JEDNOG UZORKA

U prethodnom odlomku nabrojana su tri popularna programa koji obično računalo pretvaraju u CNC kontroler prevodeći unesene naredbe u niz impulsa koji se šalju/primaju preko paralelnoga porta. Do sada je riješen mehanički i elektronički dio projekta te jedan dio programskog dijela. Nedostaje opis postupka dobivanja NC *koda* koji *Mach3* ( *LinuxCNC*, *KCam* ) koriste za generiranje niza impulsa koji za posljedicu imaju gibanje stroja. Taj dio danas obavljaju CAM alati. Za jednostavne zadaće mogu se naredbe ručno unositi u bilo koja od tri gore spomenuta programa jer oni doslovno imitiraju sučelja kontrolera kakvi se nalaze na CNC strojevima u industrijama. Naravno da pokraj velikog izbora programskih alata koji i hobistima nude odlične besplatne verzije, nema puno entuzijasta koji se upuštaju u pisanje NC *koda* bez podrške računala. Postoje čak konverteri koji slike ( .jpeg, .bmp, i dr. ) pretvaraju u .DXF format ( eng. *Drawing Interchange Format* ) koji se opet može konvertirati u NC *kod*, odnosno najrašireniji programski jezik za NC strojeve, G – *kod*. G – *kod* se može direktno otvoriti u *Mach3* alatu ( ili alternativama ) ali je spomenuto da se u ovom radu neće ulaziti u njegove detalje i programiranja NC strojeva, no u ovom odjeljku će biti prikazan brzi postupak dobivanja G – *koda* pomoću *Catije* u kojoj je konstruirana i mehanika stroja.

Najprije će se klasičnom metodom na XY ravnini *Catije* modelirati primjer prikazan na donjoj slici [Slika 62]. Vanjske dimenzije obratka su 160x120x10mm.

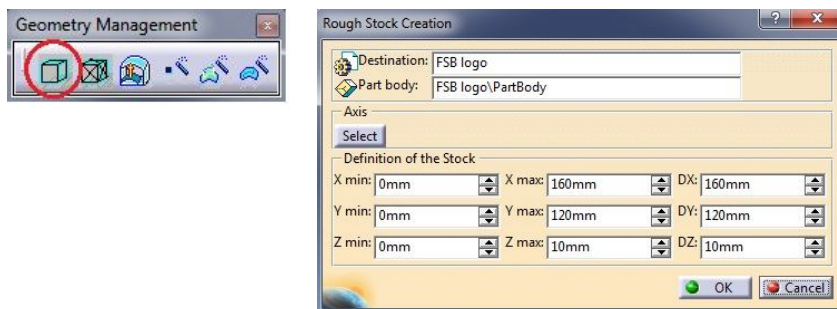


**Slika 62.** Skica i model obratka iz *Catije*

Zatim se odlazi u *Catijino* okruženje za strojnu obradu klikom na */Start/Machining/Advanced Machining*. Sa novootvorenim alatima otvara se i novo „stablo“ sa lijeve strane na čijem vrhu stoji P.P.R ( *ProcessList*, *ProductList*, *ResourcesList* ) gdje će stajati operacije koje stroj vrši, podaci o obratku, sirovac iz kojeg se dobiva obradak, prihvati stroja, rezni alati i dr..

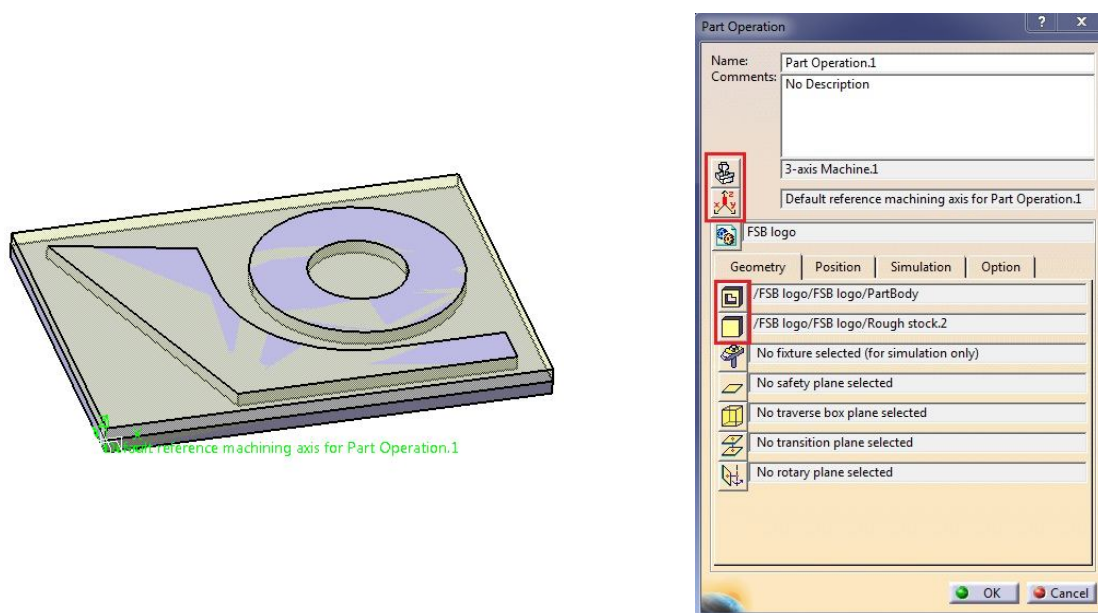


Operacija će biti glodanje pa je početni korak definiranje sirovca koji će opisati gornji model. Potrebno je u izborniku *Geometry Management*, koji se po standardu nalazi negdje u desnoj traci alata, izabrati naredbu *Create Rough Stock* [Slika 63], kliknuti na model i potvrditi sa OK.



Slika 63. Kreiranje sirovca za model

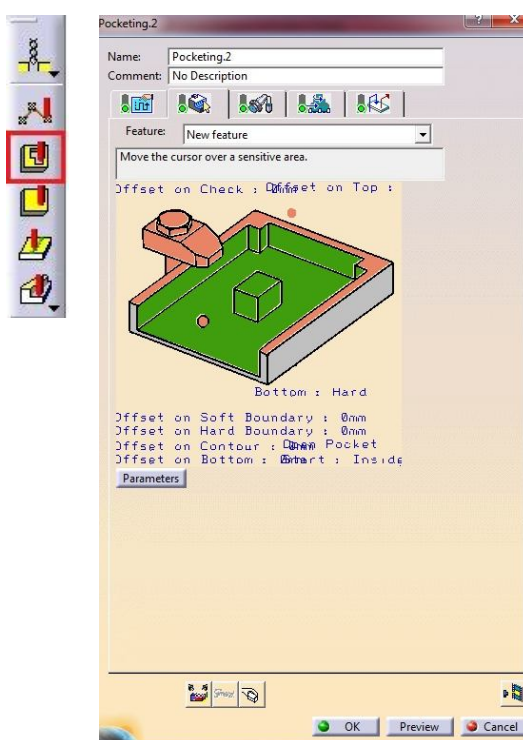
Ovim postupkom se oko modela opisuje kvadar [Slika 64] čije dimenzije odgovaraju minimalnim dimenzijama sirovca od kojeg se željeni model može glodati. Slijedi definiranje postupka operacija na obratku dvostrukim klikom na *Part Operations* koji se nalazi pod *Process* tabom u stablu lijevo. Važno je u ovom prozoru [Slika 64] odabrati vrstu stroja klikom na prvu ikonu (izabire se 3 – axis Machine). Sljedeća ikona nudi postavljanje referentnog koordinatnog sustava na obradak. Klikom na nju otvara se novi prozor u kojem se pomicanjem pojedinih osi ili klikom na točku ishodišta može postaviti koordinatni sustav. Za konkretan ga slučaj nije potrebno mijenjati jer je on postavljen na zadovoljavajuće mjesto.




Slika 64. Model opisan sirovcem (lijevo), *Part Operation* izbornik (desno)



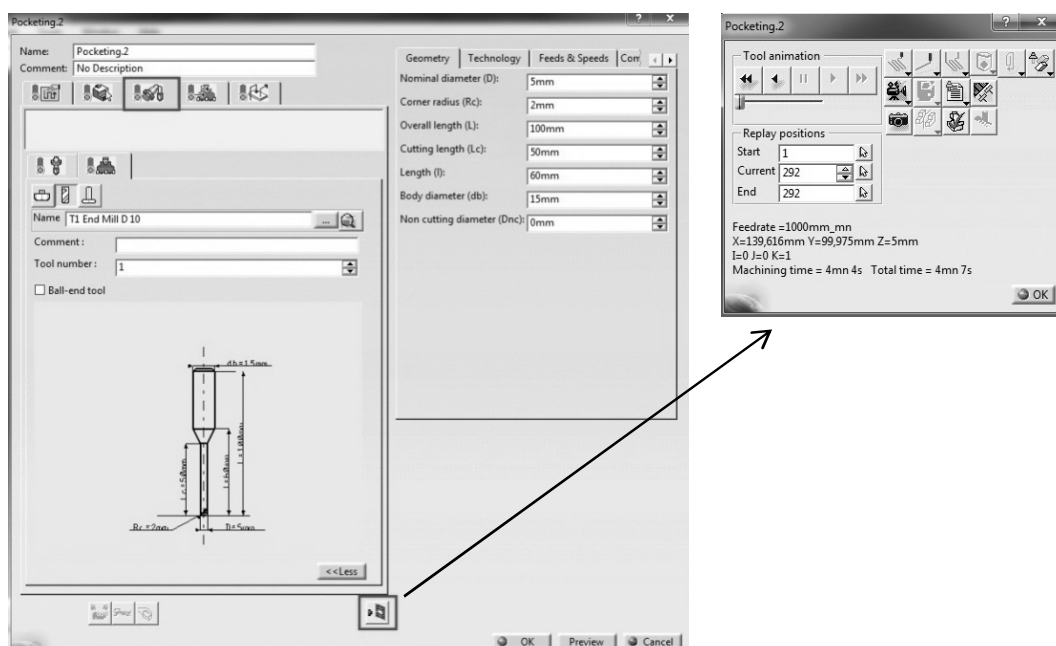
Sljedeća ikona, *Design Part for Simulation*, nudi izbor modela koji će biti podvrgnut obradi. Iz stabla lijevo, */ProductList/ImeModela*, dvostrukim klikom se potvrđuje *PartBody* nakon čega se vraća prozor *PartOperation*. Za kraj se izabire ikona *Stock* kojom se definira sirovac na istoj adresi u stablu kao *PartBody*, naziva *RoughStock*. Ovime je završena priprema geometrije obrade te se može potvrditi klikom na OK. Praktično je radi daljnjeg rada nakon ovih postavki isključiti prikaz sirovca tako da se on opet locira u stablu, klikne desnom tipkom miša na njega i pritisne *Hide*. Sada slijedi sam izbor operacija nad sirovcem. Kako je riječ o klasičnom glodanju iz palete alata *Machining Operations*, standardno postavljenom na lijevom rubu prozora, izabire se *Pocketing* [Slika 65].



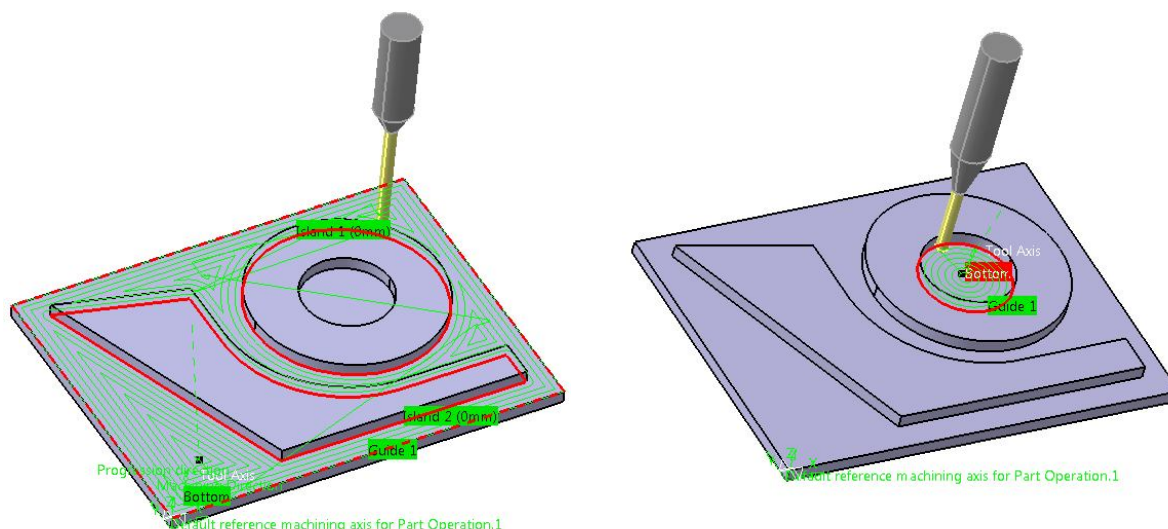
Slika 65. Naredba *Pocketing*

U novootvorenom prozoru i prikazanom modelu izabire se donja ploha kako je prikazano na gornjoj slici [Slika 65]. Ovdje je moguće mijenjati postavke koje utječu na kasnije generirani G – kod. Moguće je postaviti dimenzije reznog alata pritiskom na treći tab i gumb *More* [Slika 66]. Pritiskom na ikonu simulacije , na modelu se prikazuje putanja gibanja alata [Slika 66]. Analognim postupkom izabire se glodanje „džepa“ kako bi se dobio kružni vijenac loga [Slika 67]. Sljedeći korak je generiranje G – koda, no najprije se u postavkama *Catije*, pod */Tools/Options/Machining/Output*, treba odabrati *Post Processor* koji će generirati kod. Nude se tri mogućnosti (Cenit, IMS, ICAM) i nema pravila koju odabrati. Puno ovisi o

programu u koji će se *kod* učitati i vrlo često je ipak potrebno ručno mijenjati dijelove *koda* naknadno. U ovim postavkama još izabiru destinacije u koji će spremiti *kod*. Kad je odluka donesena, u stablu se desnim klikom na */ProcessList/PartOperation/ManufacturingProgram* iz padajućeg izbornika izabire *Manufacturing program.1 object* te *Generate NC code Interactively*. Otvara se prozor kao na slici [Slika 68] te mijenja *NC Data Type* u *NC Code*. U tabu *NC Code* se iz padajućeg izbornika izabire jedan post – procesor nakon čega se pritišće *Execute*. Na destinaciji koju smo podesili u postavkama generira se više datoteka od kojih je jedna sa ekstenzijom *.NC* koja se učitava u *Mach3*.

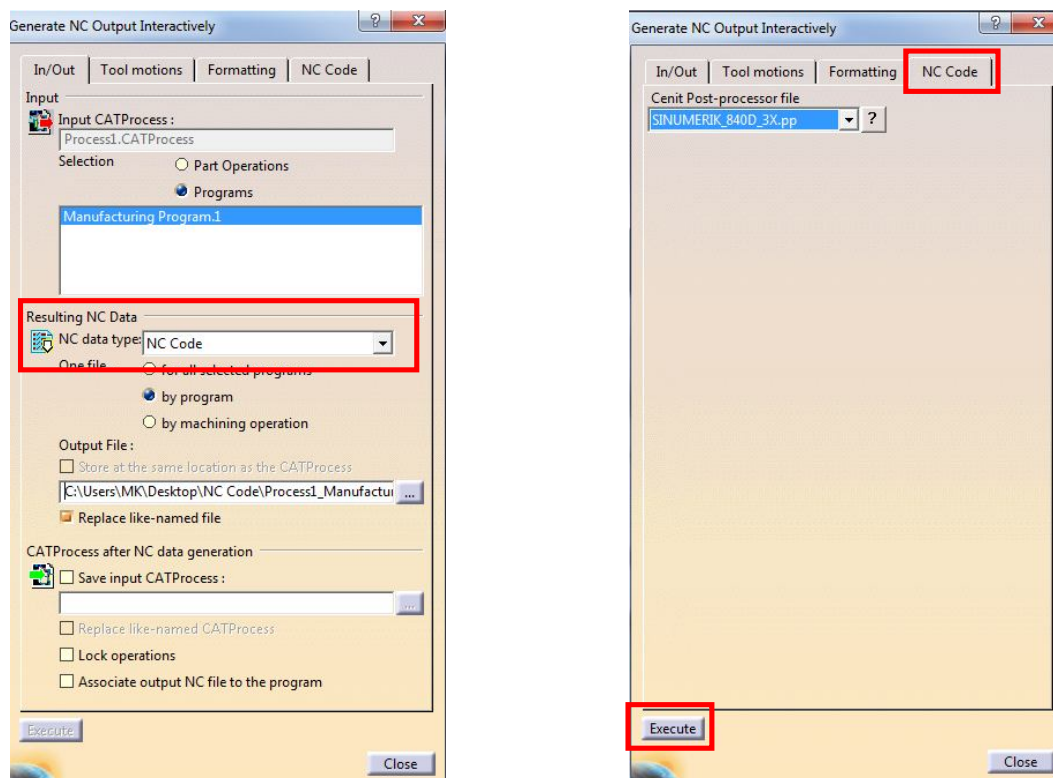


Slika 66. Postavke reznog alata (lijevo) i prikaz prozora za simulaciju rada (desno)



Slika 67. Putanje reznog alata u *Catiji*

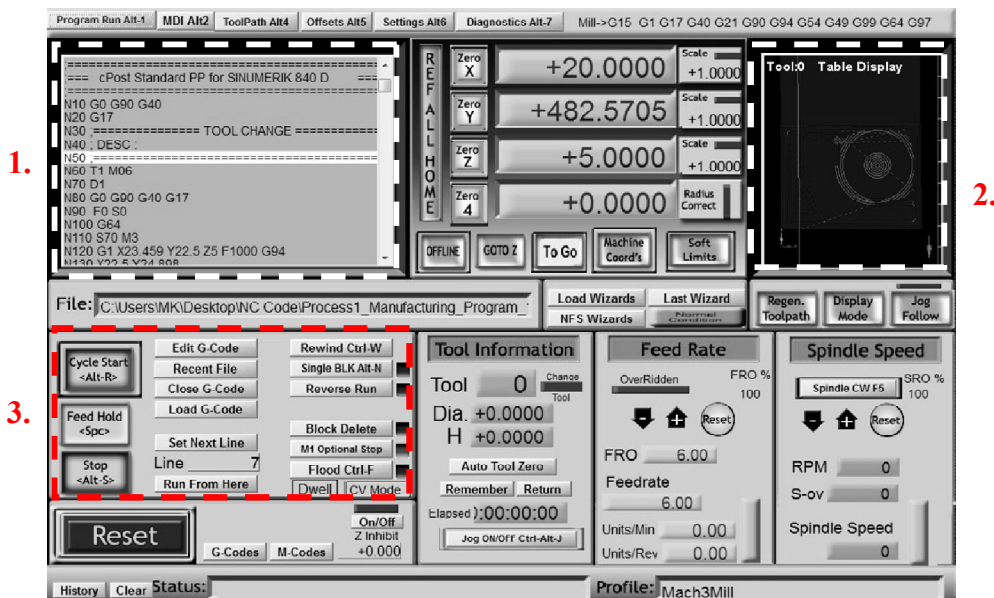
Post – procesor je dakle veza između CAM programskih alata i NC stroja. Ne postoji standard u industriji koji definira programski jezik i rad post – procesora. Na primjeru u *Catiji* vidljiv je velik izbor. Samo troje različitih proizvođača nudi na desetke različitih post – procesora. Poželjno je stoga ipak poznavati strukturu NC *koda* kako bi se zadaci mogli obaviti brže i fleksibilnije. Kod stolnih glodalica to ne dolazi toliko do izražaja zbog relativno jednostavnih zadataka.



Slika 68. Postavka izlazne datoteke i izbor post – procesora

Primjer glodanja opisanog obratka daje preko 200 linija G – *koda* koji je spreman za učitavanje u *Mach3* klikom na */File/Load G – Code*. Pretpostavlja se da su podešene postavke limita, pinova i dinamike motora kao što je opisano u prethodnom poglavlju. U *ProgramRun* prozoru koji se otvara vidljiv je G – *kod* u lijevom podprozoru, na donjoj slici [Slika 69] označen brojem 1. U desnom podprozoru prikazane su putanje alata na stroja [Slika 69], redni broj 2. Za manipulaciju G – *kodom* bitne su naredbe označene trećim kvadratom na slici [Slika 69]. Osim klasičnih naredbi za start ( *Cycle Start* ), zaustavljanje ( *Cycle Stop* ) i privremeno pauziranje ( *Free Hold* ), ovdje su gumbi za učitavanje, zatvaranje i uređivanje *koda* ( *Load*, *Close*, *Edit G - Code* ). Moguće je vidjeti popis G naredbi i njihove funkcije pritiskom na G – *Codes* pokraj *Reset* gumba što može poslužiti kao podsjetnik ukoliko je potrebno mijenjati linije učitane *koda*. U tabu *ToolPath* ( *Alt+4* ) moguće je pokrenuti

simulaciju rada pritiskom na *Simulate Program Run* [Slika 70] te tako otkriti greške u *kodu* i potrebno vrijeme rada stroja uz postavljene parametre. Bilo je potrebno nešto više od 10min za obradu sa 80 impulsa za puni okret, brzinom 500 mm/min i ubrzanjem od 125mm/sec<sup>2</sup>.



Slika 69. Učitani NC kod u Mach3 programu

Spuštanjem brzine na 300mm/min i akceleracije na 50mm/sec<sup>2</sup> vrijeme obrade se popelo na 17min, što je realnije za projektiranu stolnu glodalicu. Vrijeme obrade jednako zavisi o dinamici stroja kao i generiranom *kodu*. Ako u *kodu* ima puno dostavnog gibanja stroja to znatno produžuje vrijeme.






Slika 70. ToolPath i Simulate Program Run u Mach3 programu

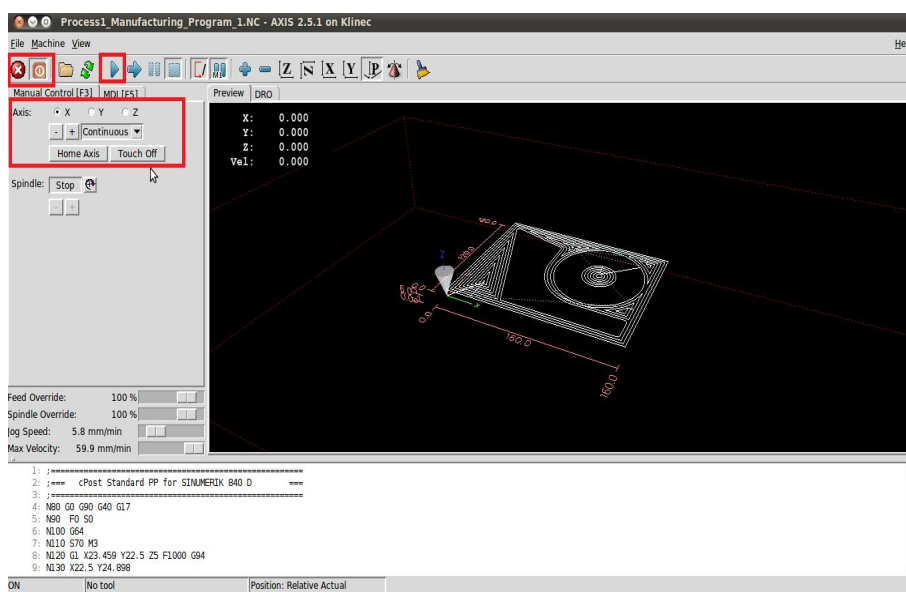
U kratkim crtama prikazan je primjer generiranja G – koda u *Catiji*, njegovo učitavanje u *Mach3* i osnovne naredbe. Za uspješan rad na stolnoj glodalici korištenjem ova dva programa potrebna su minimalna znanja iz strojne obrade kao i razumijevanje NC koda. Često su potrebne modifikacije u kodu zbog raznovrsnosti post – procesora ili iz praktičnih razloga tokom rada. *Catia*, iako odlično rješenje za korištenje sa *Mach3* alatom, zbog svoje kompleksnosti nema puno korisnika sa stolnim glodalicama. Razlog su jednostavni zadaci koji se obavljaju na stolnim glodalicama koji ne zahtijevaju takvu programsku podršku. Pri instalaciji *Mach3* programa nudi se mogućnost instaliranja *LazyCam* programa koji je *ArtSoft* – ovo rješenje za generiranje DXF datoteke u G – kod. *LazyCam* kao ni *Mach3* nije besplatan ali nudi osnovne funkcije u demo verziji. Na tržištu postoje besplatne verzije CAD alata iz kojih se može dobiti .DXF format obratka, a taj pak se format unosi u besplatne konvertere koji generiraju G – kod za *Mach3* ili druge programe. Ne mogu se uspoređivati sa komercijalnim rješenjima ali su idealni za hobiste i stolne glodalice.

Odličan za hobiste je spomenuti *EMC2* koji, osim što je besplatan, nudi veliku fleksibilnost u radu te zadovoljavajuću podršku i dokumentaciju. Za razliku od *Mach* - a, *EMC2* ne nudi dodatne alate za konverziju datoteka ali ima integrirane alate koji omogućuju direktno otvaranje različitih datoteka. Pokraj klasičnih datoteka ( .NC ) sa G – kodom mogu se otvarati još .NGC, .PGN, .GIF, .JPEG, .PY i mnoge druge. Otvaranjem slikovnih datoteka *EMC2* nudi njihovu osnovnu obradu kako bi se uspješno generirao kod. Na donjoj slici [Slika 71] prikazan je NC kod koji je dobiven iz *Catije*. Uz pretpostavku da su stroj i program



konfigurirani ( preko *StepConf Wizard* objašnjenog ranije ), vrši se reset stroja (  ), paljenje (  ) postavljanje stroja u inicijalno poziciju ( *Home Axis* ) te je zatim moguće pokrenuti obradu (  ) [Slika 71].

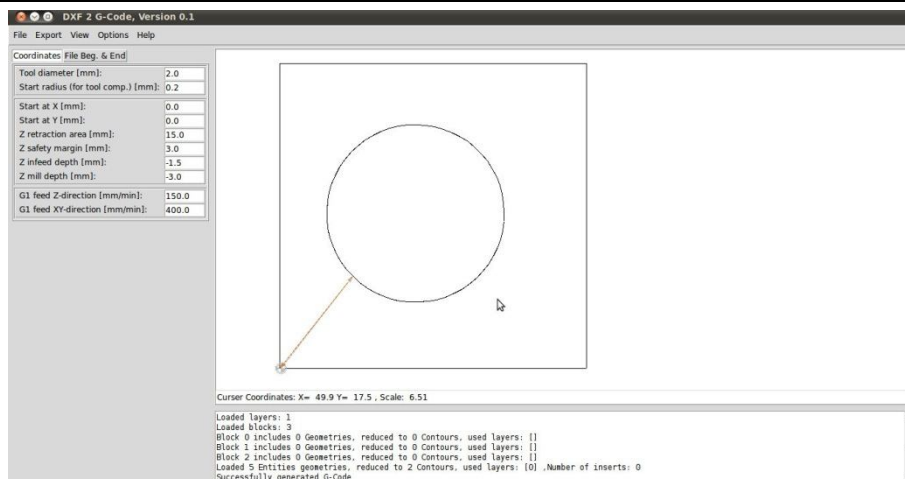
Pomoću CAD alata namijenjenih Linux OS – ima ( npr. *QCAD*, također besplatan ) mogu se dobiti .DXF datoteke koje se dalje konvertiraju pomoću lako dostupnih alata na internetu ( npr. *dxf2gcode* ). Vrlo popularni u radu sa EMC alatom su besplatni<sup>8</sup> programi pisani u *Pythonu* koje karakterizira samo jedna funkcija za koju su namijenjeni. To može biti bušenje, graviranje teksta, različiti algoritmi za glodanje „džepova“ ( eng. *Pocketing* ) i dr.. Na donjim slikama [Slika 72], [Slika 73] prikazan je izgled *dxf2gcode* i *Engrave* alata.



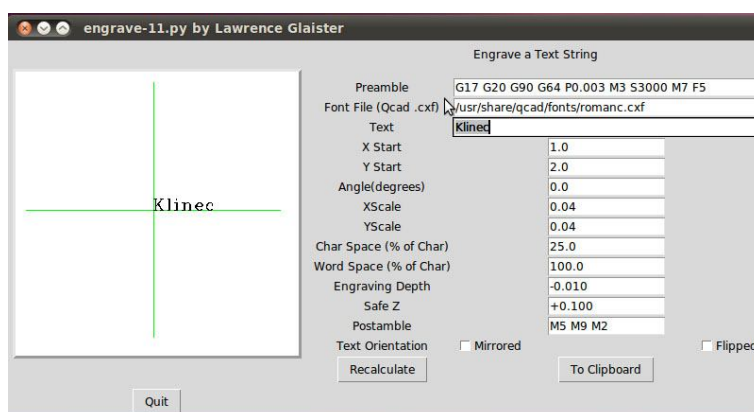
**Slika 71. Primjer obratka u EMC2 alatu**

Jedini nedostatak *EMC2* alata kod njegovog korištenja sa stolnim glodalicama jest njegova manja transparentnost u odnosu na komercijalne alate. Zbog nepopularnosti Linux operativnih sustava, tj. većeg angažmana koji je potreban za upoznavanje, podešavanje i korištenje sustava, ovaj odličan alata ostaje marginaliziran. Djelomično je tome zaslužna komercijalna konkurencija koja daje dobar omjer uloženog i dobivenog a djelomično neupućenost u mogućnosti. *EMC2* nema širinu funkcija kao primjerice *Mach3* ali to ne mora ujedno biti nedostatak jer su sve bitne opcije za stolne glodalice zastupljene.

<sup>8</sup> GNU ( *General Public Licence* ) licenca koja karakterizira programe čiji izvorni kod je namijenjen za slobodno uporabu, izmjene, dopune i dr.

Slika 72. *dxf2gcode* program

Na gornjoj slici [Slika 72] je *dxf2gcode* program čija namjena je već spomenuta i očigledna iz imena. Alat je funkcionalan i odlično obavlja namijenjenu zadaću te će zadovoljiti i zahtjevnije korisnike. *Engrave* alat namijenjen je graviranju jednog reda teksta. Za rad mu je potreban *QCAD* jer koristi iste fontove slova. Postoje inačice alata za višeredno graviranje teksta koji je također jednostavan za korištenje.

Slika 73. *Engrave* program za generiranje G –koda

Alati namijenjeni jednoj zadaći, kao što su *Engrave* i *dxf2gcode*, mogu pojednostaviti korištenje računala kao kontrolera CNC glodalice. Bez suvišnih vizualnih efekata i naprednih opcija, oni su funkcionalni i svrsishodni. Nisu idealna rješenja, još uvijek u nekim segmentima zaostaju za konkurencijom ali mogu biti odličan izbor za hobiste ali i iskusnije korisnike *Linuxa* i *Pythona*.

## 6. ZAKLJUČAK

Stolne CNC glodalice čija popularnost je neupitna, sve više iz hobi područja prelaze u ozbiljne strojeve čija primarna funkcija je stvaranje vrijednosti i isplativost. Kroz ovaj rad pokriveni su svi dijelovi ovakvih strojeva, od mehaničke konstrukcije preko upravljačke elektronike sa motorima do programske podrške. Svaki taj dio je podjednako važan kako bi se dobio kvalitetan i konkurentan stroj. Na području Hrvatske postoji već nekoliko tvrtki koje se bave konstruiranjem stolnih CNC glodalica po mjeri. Primjena im je ogromna, a ona najviše definira visinu cijene cijelog projekta. Gledano sa financijske strane, velike su razlike između, primjerice, stolnih glodalica namijenjene glodanju mekih metala i strojeva čija primarna funkcija je „samo“ bušenje ( uz pretpostavku istih radnih dimenzija ). Osim ovih dviju funkcija, popularni zadatak ovakvih strojeva sve je više rezanje vrućom žicom jer modelarima daje fleksibilnost i odlične rezultate uz malen ulog.

Mehanički dio stolnih glodalica je, neovisno o njihov namjeni, u većini slučajeva isti. Osnovni element za dobivanje linearnih gibanja su kuglična navojna vretena. Ovisno o proizvođaču i kvaliteti njihova cijena varira, ali daje neosporno bolje rezultate od preciznih trapeznih vretena ili metričkih navojnih šipki. Manje spominjani, ali ne i manje važni, jesu radijalno – aksijalni ležajevi korišteni za fiksiranje krajeva kugličnih navojnih vretena. Loš izbor ovdje može značajno utjecati na rad stroja kao i vijek trajanja. Sljedeća bitna komponenta za dobivanje jednakomjernog linearnog gibanja jesu linearne vodilice, tj. linearni ležajevi. Kod masivnijih strojeva, većih dimenzija i opterećenja, preporučaju se profilne vodilice dok hobisti uglavnom koriste linearne ležajeve i osovine. Kvaliteta i izbor ovih komponenti također značajno utječe na konačnu cijenu stroja. Radi jednostavnosti, poželjno je da konstrukcija stroja bude od standardnih profilnih aluminijskih profila koji uz malu masu daju odličnu čvrstoću. Stroj u ovom radu nije izrađen od aluminijskih profila iako je korišten aluminij debljine 15mm i 10mm za pozicije na pomičnom mostu stroja. Konstrukcija također nije spretno izvedena jer spomenuti pomični most u statici generira moment oko Y osi što za posljedicu ima veća opterećenja na linearne ležajeve i kuglično navojno vreteno na X osi. Razlog je što vertikale pomičnog mosta nisu okomite na radnu ploču već pod kutem čime se htio dobiti veći radni hod vretena.

Za pogon stroja odabrani su koračni motori. Oni su jeftiniji od servomotora koji su alternativa jer za razliku od njih ne trebaju povratnu petlju ( enkodere ). Kod koračnih motora



se stoga može pojaviti gubitak u koraku prilikom većih opterećenja što za posljedicu ima greške u obradi. Ipak, oni su i dalje prvi izbor kod stolnih glodalica jer daju odličan omjer dobivenog i uloženog. U radu su korištena tri koračna motora, svaki za pojedinu os. Svaki od njih zahtijeva upravljačku elektroniku koja ih pokreće. Projektirane su pločice za upravljanje koračnim motorima temeljene na *L297* i *L298N* čipovima koje su se pokazali kao zadovoljavajuće rješenje. Najveći nedostatak im je nemogućnost rada motora u mikrokoračima ( eng. *microstepping* ) što danas većina drivera ima. Mikrokorakačenje daje jednakomjernije gibanje motora i smanjuje pojavu rezonancije. Zaštitna pločica ( BoB ) preko koje se šalju signali na/sa računala uvijek je poželjna pri radu sa stolnim glodalicama i nije mjesto gdje se štedi na projektu.

Od tri spomenuta programska rješenja, *Mach3* je prvi izbor a u *KCam* – u ima glavnu konkurenciju. Iako manje, poznat *LinuxCNC* ( *EMC2* ) nudi odlično rješenje hobistima. Rad u njemu je ugodan i transparentan čak i za slabije poznanike *Linuxa*. Sva tri programa komuniciraju sa strojem preko paralelnog porta što je ujedno i najveći nedostatak kompletnog projekta. Paralelni port je odavno zamijenjen USB – om zbog svih prednosti koje nosi stoga je ova metoda upravljanja preko paralelnog i serijskog porta potpuno zastarjela. Tržište preplavljaju programi i upravljačka elektronika koja komunicira preko USB – a. Paralelni port ostaje kao mogućnost samo zbog svoje jednostavnosti i popularnosti kod hobista.

Nakon što su pokriveni svi troškovi za izradu stroja slobodno se može reći da je isplativost investicije više nego upitna. Glodalica jednakih dimenzija i funkcija može se na tržištu pronaći uz približno istu cijenu. Razlika u cijeni sigurno ne premašuje vrijeme uloženo u projektiranje i razvoj stroja pa se slobodno se može zaključiti da komercijalna rješenja opravdavaju uloženi novac. Razlog tome su serijske proizvodnje koje smanjuju troškove materijala i izrade. Kod samogradnje je prednost što se detaljno poznaje stroj, njegove mogućnosti i mane. Vrijednost cijele investicije ovog projekta kreće se u rangu od 9000kn što ujedno predstavlja minimalne troškove koji se mogu očekivati pri izradi stolne glodalice sličnih karakteristika. Oko 60% troškova otpada na mehaniku stroja i konstrukciju općenito, ali taj faktor puno ovisi o korištenom materijali. Ako se koriste preporučeni standardni aluminijski profili taj postotak je znatno veći. Upravljačka elektronika za motore sa 2A/fazi na tržištu se može naći uz 30% do 40% višu cijenu nego je uloženo u kupnju komponenata. Sva ta elektronika nudi *microstepping* pa time opravdava višu cijenu.

## **PRILOZI**

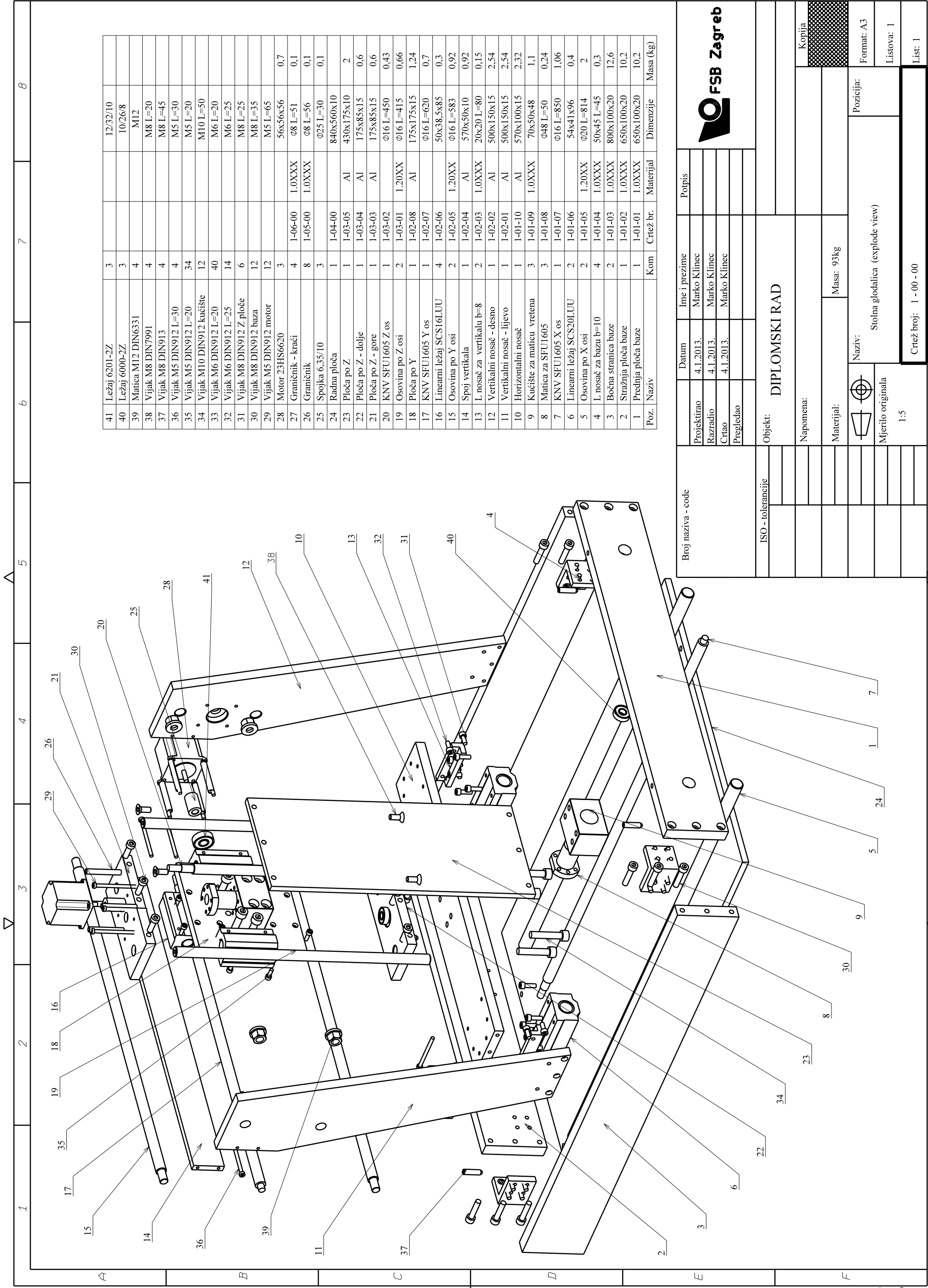
- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

## LITERATURA

- [1] Škorić, S.: *Uvod u obradu odvajanjem čestica*, Materijali za predavanja, FSB 2008.
- [2] e-Project Team: *Ball Screw tutorial*, NSK Ltd.
- [3] Rexroth Bosch Group: *Precision Ball Screw Assemblies R310EN 3301*, Bosch Rexroth AG 2009.
- [4] SKF Group: *Ball Screw, Publication 4141 EN*, SKF Group 2008.
- [5] SKF Group: *Linear motion standard range, Publication 4664/6 EN*, SKF Group 2008.
- [6] Hughes, A.; *Electric Motors and Drives 3rd Edition*, Elsevier 2006.
- [7] [www.solarbotics.net](http://www.solarbotics.net), *Stepper Motor Basics*, Industrial Circuits Application Note, 7.12.2012.
- [8] Jones, D. W.: *Control of Stepping Motors – Tutorial*, University of Iowa 1995.
- [9] <http://probotix.com>, 10.12.2012.
- [10] SGS-THOMSON Microelectronics: *The L297 Stepper Motor Controller*, Application Note AN470/0392
- [11] GECKODRIVE, INC.: *Step Motor Basics Guide*, Tustin CA
- [12] Fenerty A., Prentice J.: *Using Mach3Mill, Users Guide*, Mach Developers 2006.
- [13] LinuxCNC Team: *LinuxCNC, Getting Started*, LinuxCNC.org, 2012.
- [14] [www.trolist.hr](http://www.trolist.hr), 21.11.2012.
- [15] [www.foamlinux.com](http://www.foamlinux.com), 21.11.2012.
- [16] [www.zenbot.com](http://www.zenbot.com), 21.11.2012.
- [17] [www.bit-tech.net](http://www.bit-tech.net), 23.11.2012.
- [18] [jkongmotor.en.made-in-china.com](http://jkongmotor.en.made-in-china.com), 23.11.2012.
- [19] [www.pbclinear.com](http://www.pbclinear.com), 6.12.2012.
- [20] [www.ina.com](http://www.ina.com), 6.12.2012.
- [21] [www.skf.com](http://www.skf.com), 6.12.2012.
- [22] [www.ruland.com](http://www.ruland.com), 6.12.2012.
- [23] [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com), 20.12.2012.
- [24] [www.selene.co/Blog/2011/07/stepper-motor-voltages-explained/](http://www.selene.co/Blog/2011/07/stepper-motor-voltages-explained/), 20.12.2012.
- [25] <http://www.machsupport.com/>, 20.12.2012.
- [26] KellyWare: *KCam4 User Manual*, KellyWare, 2009.
- [27] Petruzella, F. D.: *Electric Motors and Control Systems*, McGraw – Hill, 2010.

- [28] Yeadon, W. H., Yeadon A. W.: *Handbook of small electric motors*, McGraw – Hill, 2001.
- [29] Acarnley, P.: *Stepping Motors – A guide to theory and practice*, The Institution of Engineering and Technology, London, 2007.
- [30] Smid, P.: *CNC Programming Handbook, Second Edition*, Industrial Press Inc., 2003.
- [31] Ashby, D.: *Electrical Engineering 101, Third Edition*, Newnes, 2012.

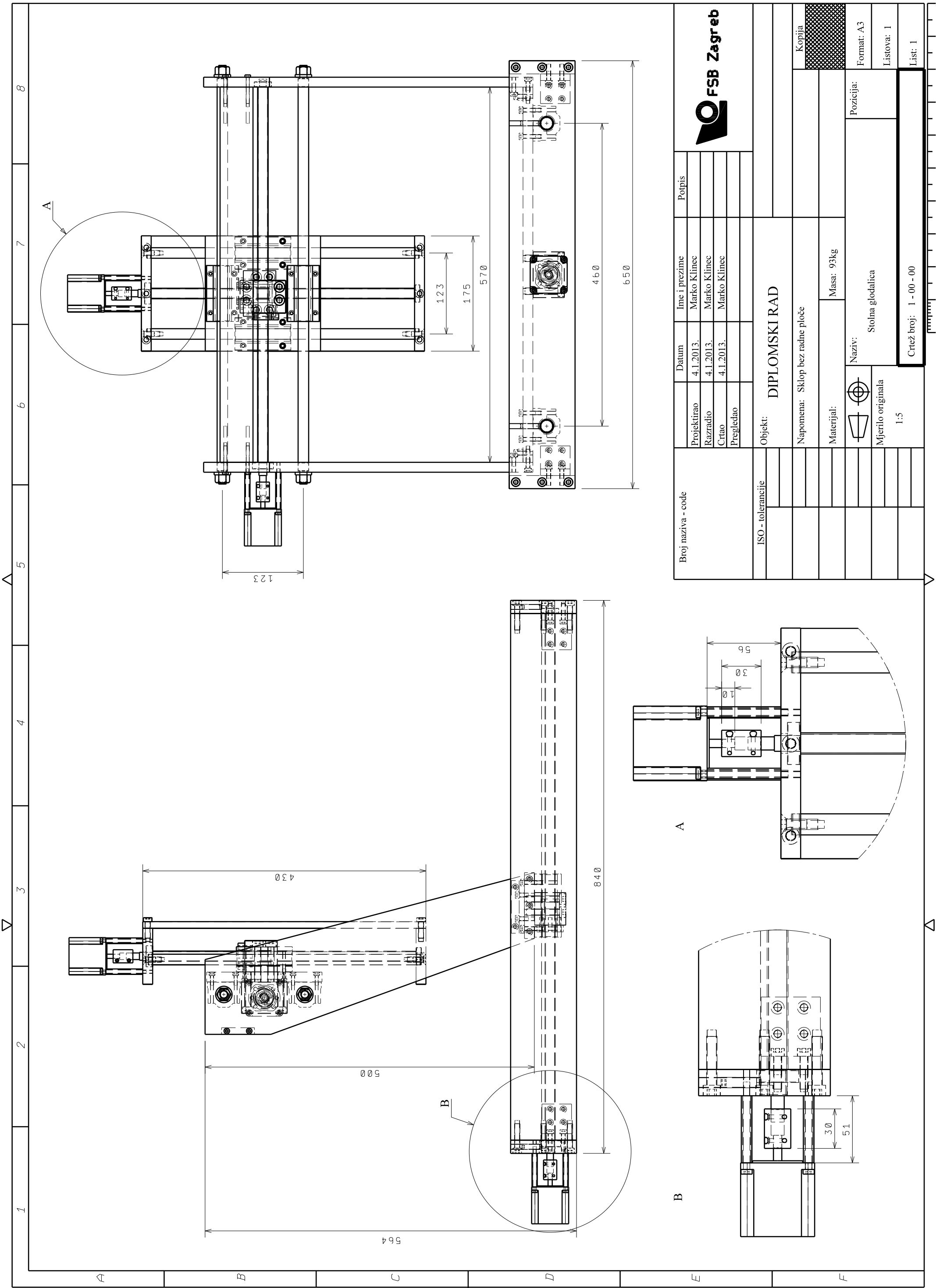
**PRILOG**  
**TEHNIČKA DOKUMENTACIJA**



41	Ležaj 6201-2Z	3				12/32/10
40	Ležaj 6000-2Z	3				10/26/8
39	Matica M12 DIN6331	4				M12
38	Vijak M8 DIN7991	4				M8 L=20
37	Vijak M8 DIN913	4				M8 L=45
36	Vijak M5 DIN912 L=30	4				M5 L=30
35	Vijak M5 DIN912 L=20	34				M5 L=20
34	Vijak M10 DIN912 kućište	12				M10 L=50
33	Vijak M6 DIN912 L=20	40				M6 L=20
32	Vijak M6 DIN912 L=25	14				M6 L=25
31	Vijak M8 DIN912 Z ploče	6				M8 L=25
30	Vijak M8 DIN912 baza	12				M8 L=35
29	Vijak M5 DIN912 motor	12				M5 L=65
28	Motor 23HS6620	3				56x56x56
27	Graničnik - kraći	4	1-06-00	1.0XXX		Ø8 L=51
26	Graničnik	8	1-05-00	1.0XXX		Ø8 L=56
25	Spojka 6,35/10	3				Ø25 L=30
24	Radna ploča	1	1-04-00			840x560x10
23	Ploča po Z	1	1-03-05	Al		430x175x10
22	Ploča po Z - dolje	1	1-03-04	Al		175x85x15
21	Ploča po Z - gore	1	1-03-03	Al		175x85x15
20	KNV SFU1605 Z os	1	1-03-02			Ø16 L=450
19	Osovina po Z osi	2	1-03-01	1.20XX		Ø16 L=415
18	Ploča po Y	1	1-02-08	Al		175x175x15
17	KNV SFU1605 Y os	1	1-02-07			Ø16 L=620
16	Linearni ležaj SCS16LUU	4	1-02-06			50x38,5x85
15	Osovina po Y osi	2	1-02-05	1.20XX		Ø16 L=583
14	Spoj vertikalna	1	1-02-04	Al		570x50x10
13	L nosač za vertikalnu b=8	2	1-02-03	1.0XXX		20x20 L=80
12	Vertikalni nosač - desno	1	1-02-02	Al		500x150x15
11	Vertikalni nosač - lijevo	1	1-02-01	Al		500x150x15
10	Horizontalni nosač	1	1-01-10	Al		570x100x15
9	Kućište za maticu vretena	3	1-01-09	1.0XXX		70x50x48
8	Matica za SFU1605	3	1-01-08			Ø48 L=50
7	KNV SFU1605 X os	1	1-01-07			Ø16 L=850
6	Linearni ležaj SCS20LUU	2	1-01-06			54x41x96
5	Osovina po X osi	2	1-01-05	1.20XX		Ø20 L=814
4	L nosač za bazu b=10	4	1-01-04	1.0XXX		50x45 L=45
3	Bočna stranica baze	2	1-01-03	1.0XXX		800x100x20
2	Stražnja ploča baze	1	1-01-02	1.0XXX		650x100x20
1	Prednja ploča baze	1	1-01-01	1.0XXX		650x100x20
Poz.	Naziv	Kom	Crtež br.	Materijal	Dimenzije	Masa (kg)

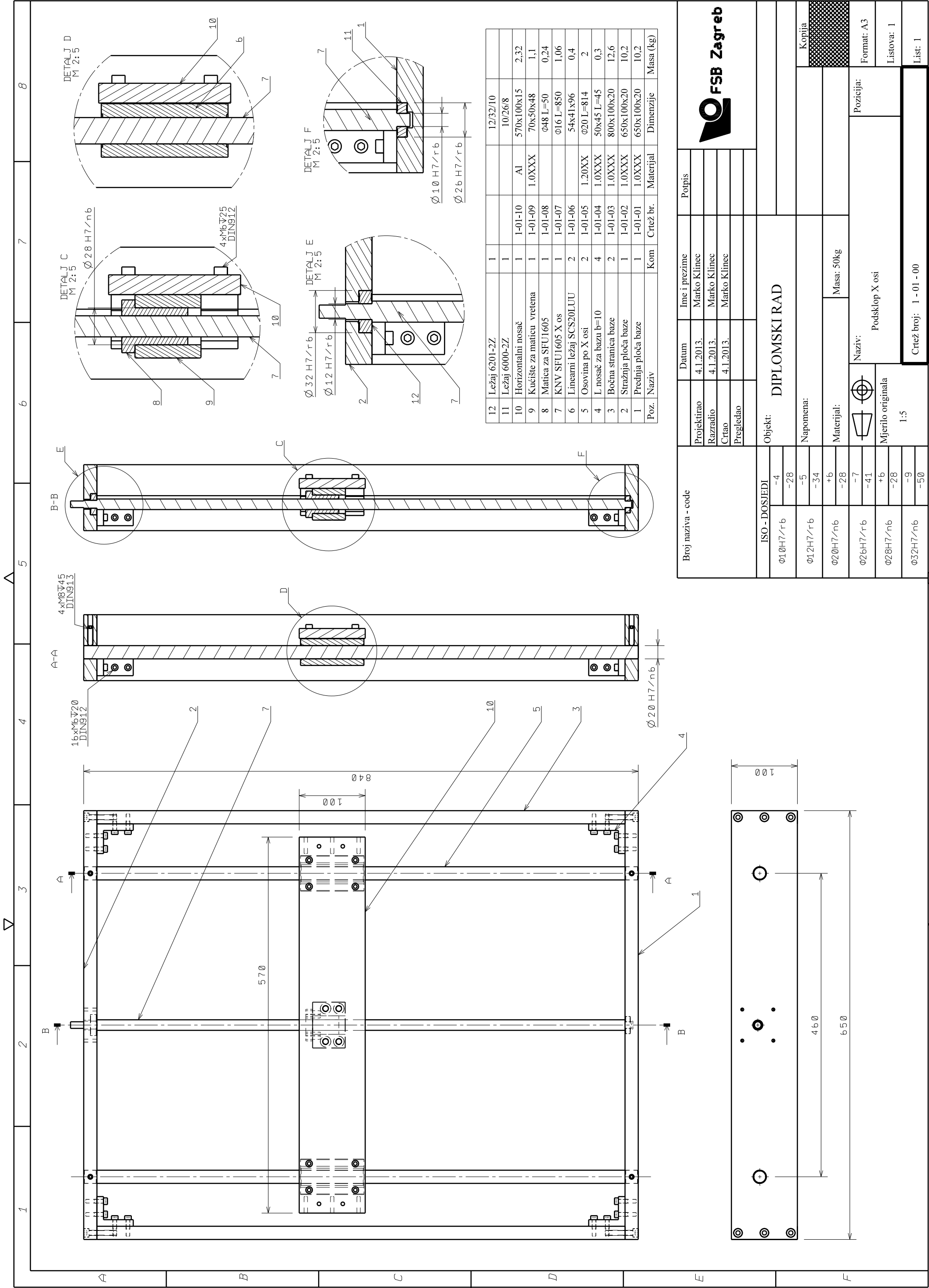
Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis
	Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec	
	Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec	
	Pregledao	4.1.2013.	Marko Klinec	
ISO - tolerancije	Objekt: DIPLOMSKI RAD			
	Napomena:			
	Materijal:	Masa: 93kg		Kopija
	Naziv:	Stolna glodalica (explode view)		Format: A3
	Mjerilo originala			Listova: 1
	1:5	Crtež broj: 1 - 00 - 00		List: 1





Broj naziva - code	Projektirao	4.1.2013.	Ime i prezime	Marko Klinec	Popis
	Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
	Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
	Pregledao				
ISO - tolerancije		Objekt: DIPLOMSKI RAD			
		Napomena: Sklop bez radne ploče			
		Materijal:		Masa: 93kg	Kopija
		Naziv:		Stolna glodalica	
		Mjerilo originala		Pozicija:	
		1:5		Format: A3	
				Listova: 1	
				List: 1	





12	Ležaj 6201-2Z	1	12/32/10	
11	Ležaj 6000-2Z	1	10/26/8	
10	Horizontalni nosač	1	1-01-10	Al 570x100x15 2,32
9	Kućište za maticu vretena	1	1-01-09	1.0XXX 70x50x48 1,1
8	Matica za SFU1605	1	1-01-08	Ø48 L=50 0,24
7	KNV SFU1605 X os	1	1-01-07	Ø16 L=850 1,06
6	Linearni ležaj SCS20LUTU	2	1-01-06	54x41x96 0,4
5	Osovina po X osi	2	1-01-05	1.20XX Ø20 L=814 2
4	L nosač za bazu b=10	4	1-01-04	1.0XXX 50x45 L=45 0,3
3	Bočna stranica baze	2	1-01-03	1.0XXX 800x100x20 12,6
2	Stražnja ploča baze	1	1-01-02	1.0XXX 650x100x20 10,2
1	Prednja ploča baze	1	1-01-01	1.0XXX 650x100x20 10,2

Poz.	Naziv	Kom	Crtež br.	Materijal	Dimenzije	Masa (kg)
------	-------	-----	-----------	-----------	-----------	-----------

Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Popis
	Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec	
	Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec	
	Pregledao			
ISO - DOSJEDI		Objekt: DIPLOMSKI RAD		
Ø10H7/r6	-4 -28			
Ø12H7/r6	-5 -34			
Ø20H7/r6	+6 -28	Materijal: Masa: 50kg		
Ø26H7/r6	-7 -41	Naziv: Podsklop X osi		
Ø28H7/r6	+6 -28	Mjerilo originala 1:5		
Ø32H7/r6	-9 -50	Crtež broj: 1 - 01 - 00		

FSB Zagreb

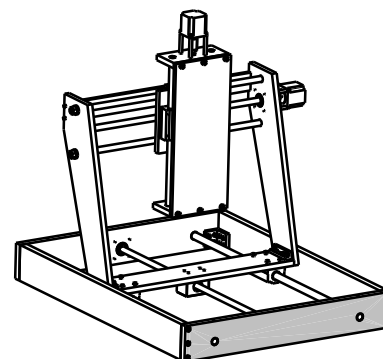
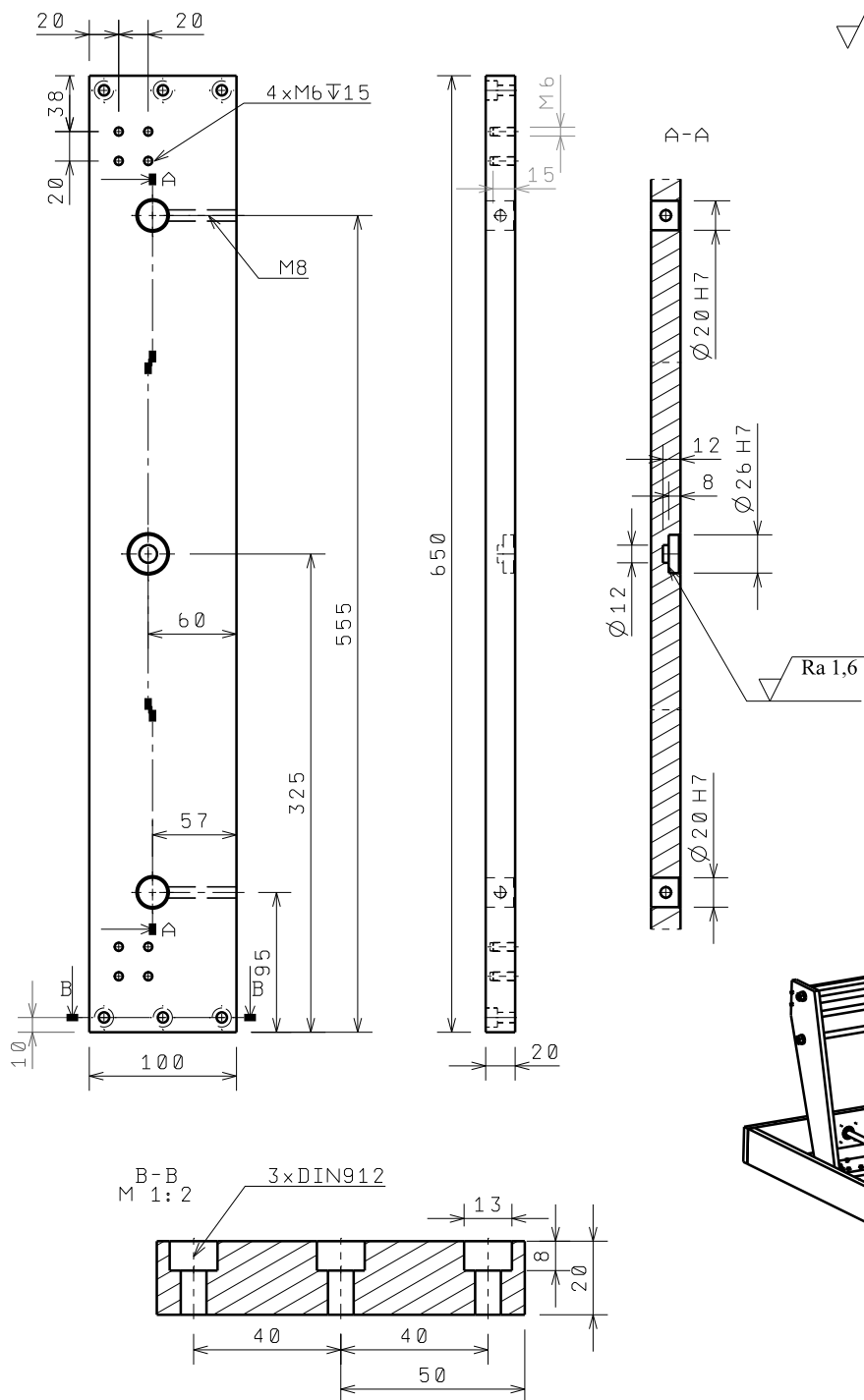
Kopija

Format: A3


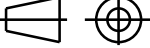
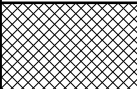
Listova: 1

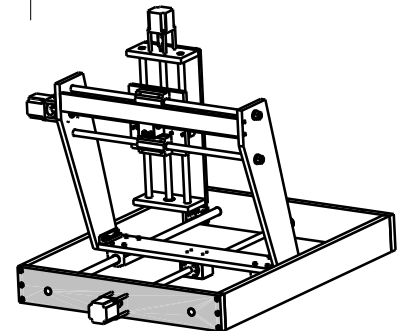
List: 1




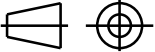


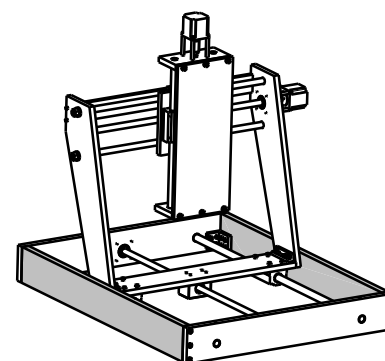
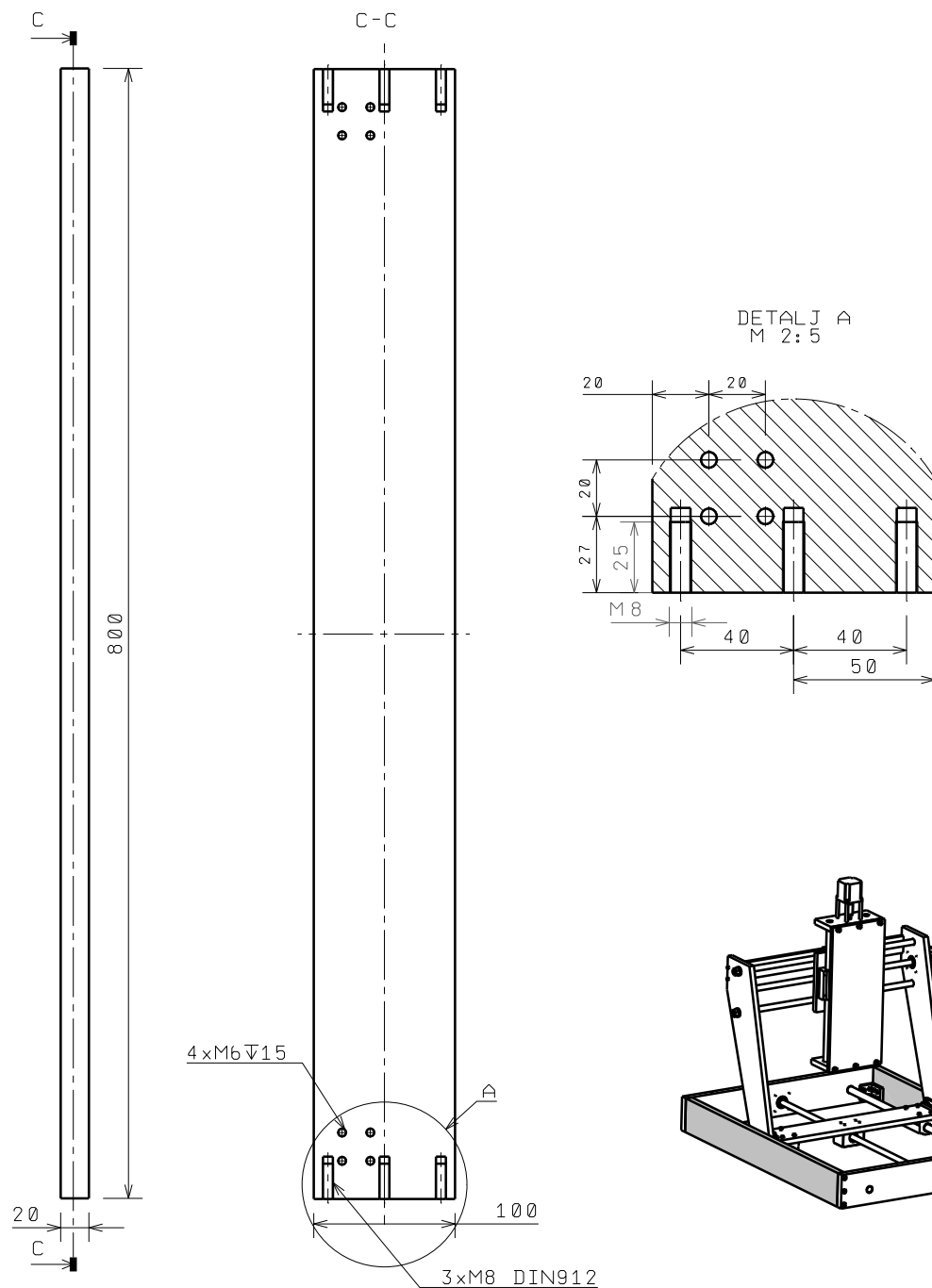
ISO-TOL.	
∅20 H7	+21 0
∅26 H7	+21 0




	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				
Materijal: 1.0XXX		Masa: 10,2kg		
	Naziv: Prednja ploča baze		Pozicija: 1	Kopija
	Mjerilo originala M 1:5			
		Crtež broj: 1-01-01	Format: A4 Listova: 1 List: 1	

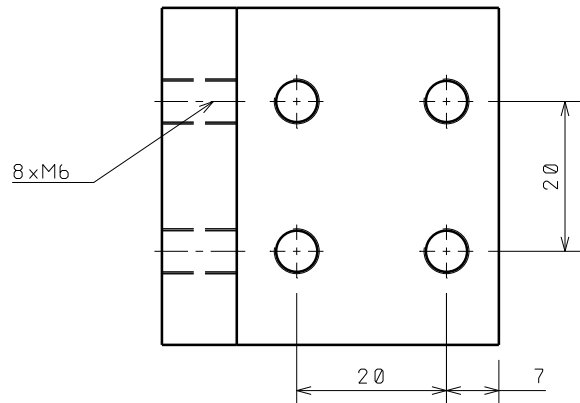
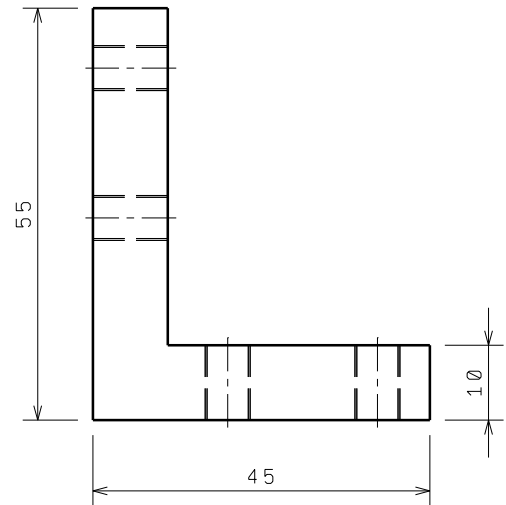
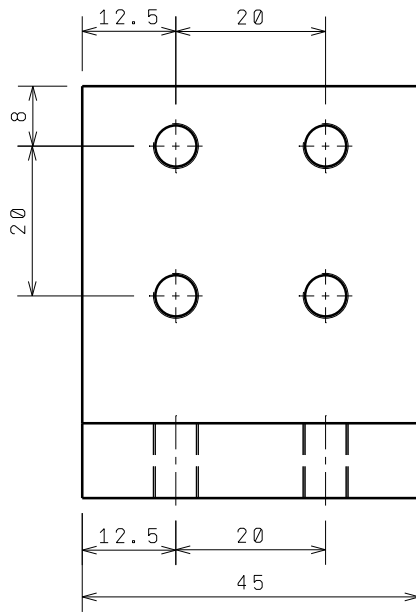




ISO-TOL.	
Ø20H7	+21
	0
Ø32H7	+25
	0

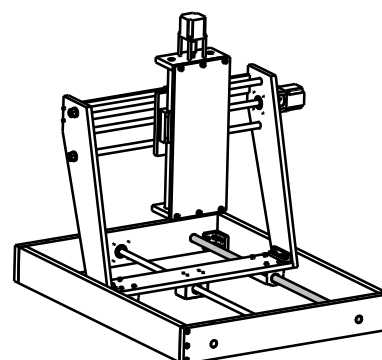
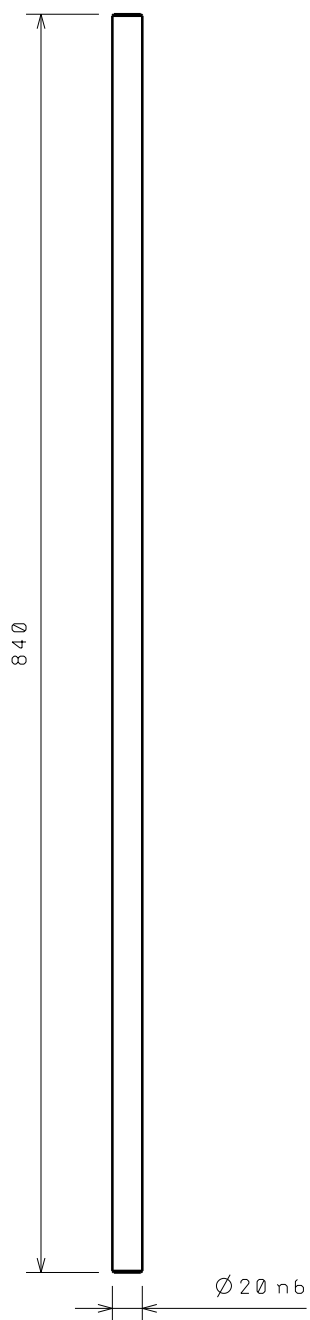
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal: 1.0XXX		Masa: 10,2kg		
		Naziv:  Stražnja ploča baze	Pozicija:  2	Format: A4
Mjerilo originala  M 1:5				Listova: 1
Crtež broj:  1-01-02				List: 1




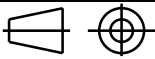
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal: 1.0XXX		Masa: 12,6kg		
 	Naziv: Bočna stranica baze		Pozicija: 3	Format: A4
Mjerilo originala M 1:5	Crtež broj: 1-01-03			Listova: 1
				List: 1

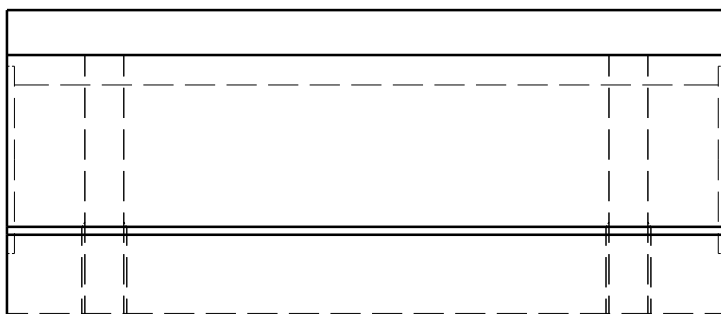
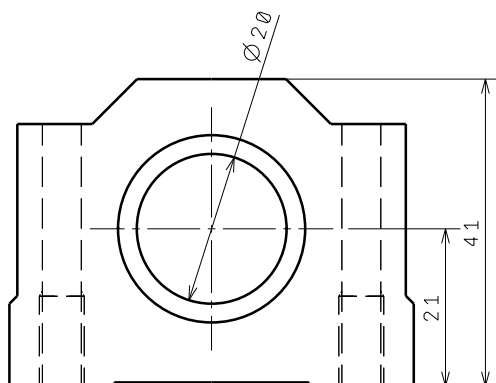
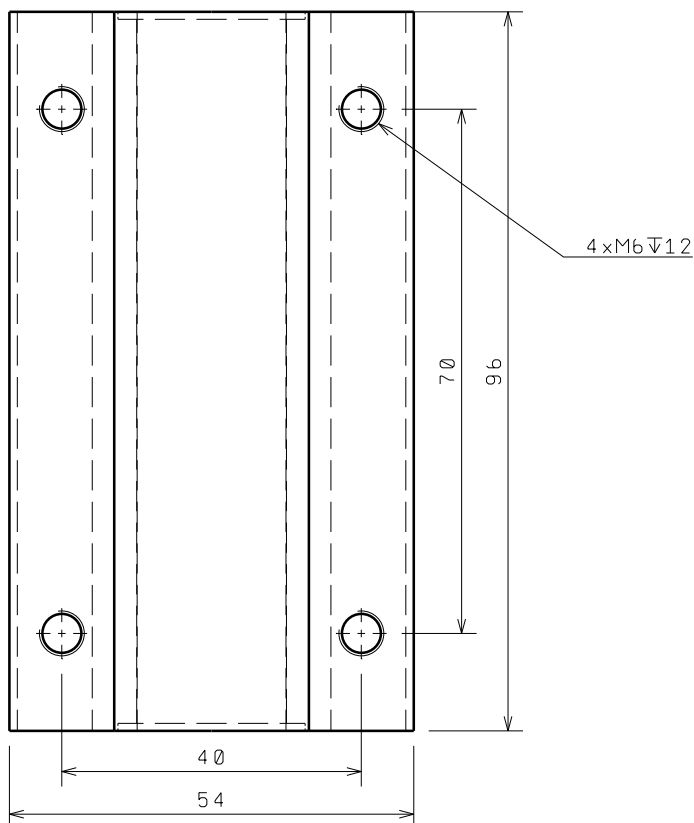



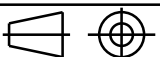
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt:			DIPLOMSKI RAD	
Napomena:				
Materijal: 1.0XXX		Masa: 0,3kg		
		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo originala  M 1:1		L nosač za bazu		4
		Crtež broj:		1-01-04
		Kopija		

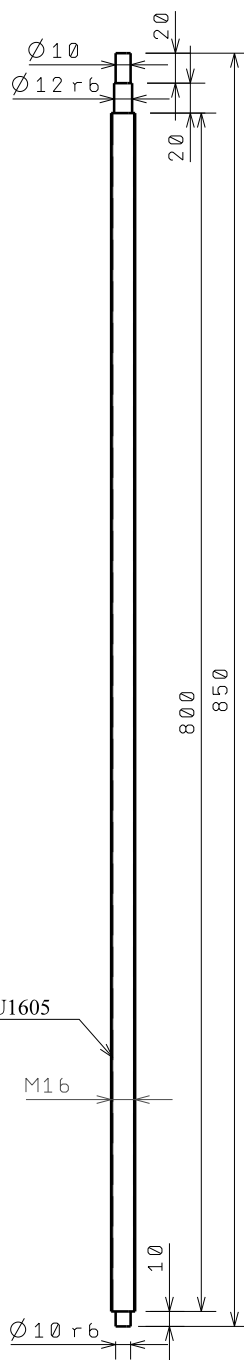


ISO-DOS.	
Ø20H7/n6	+6 -28

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt:				
DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				
Materijal: 1.20XX		Masa: 2kg		
 Mjerilo originala M 1:5	Naziv:		Pozicija:	Kopija
	Osovina za X os		5	Format: A4
	Crtež broj:		1-01-05	Listova: 1
			List: 1	



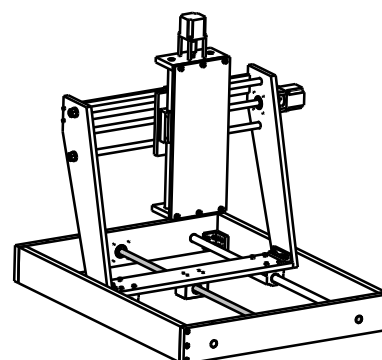
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao				
Razradio				
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt:				
DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa: 0,4kg		
 Mjerilo originala M 1:1	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Linearni ležaj SCS20LUU		6	Listova: 1
	Crtež broj:		List: 1	
		1-01-06		





KNV SFU1605

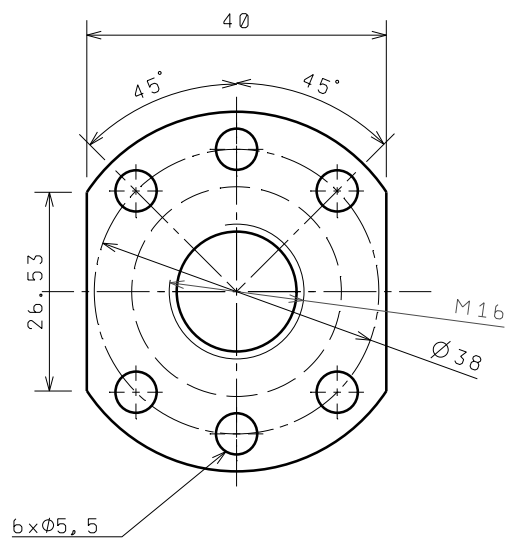
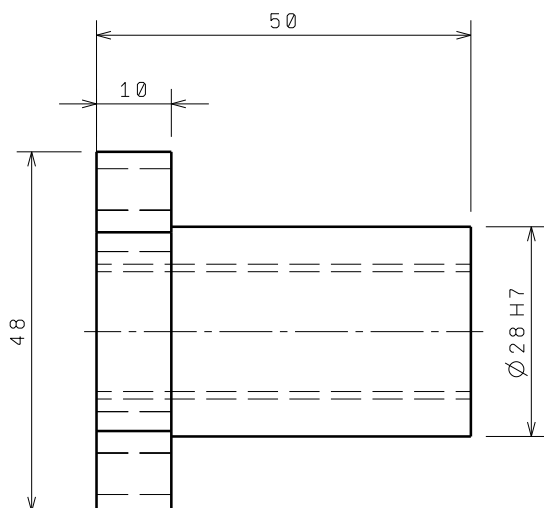
M16

Ø10 r6


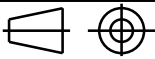


ISO-TOL.	
Ø10 r6	+28 +19
Ø12 r6	+34 +23

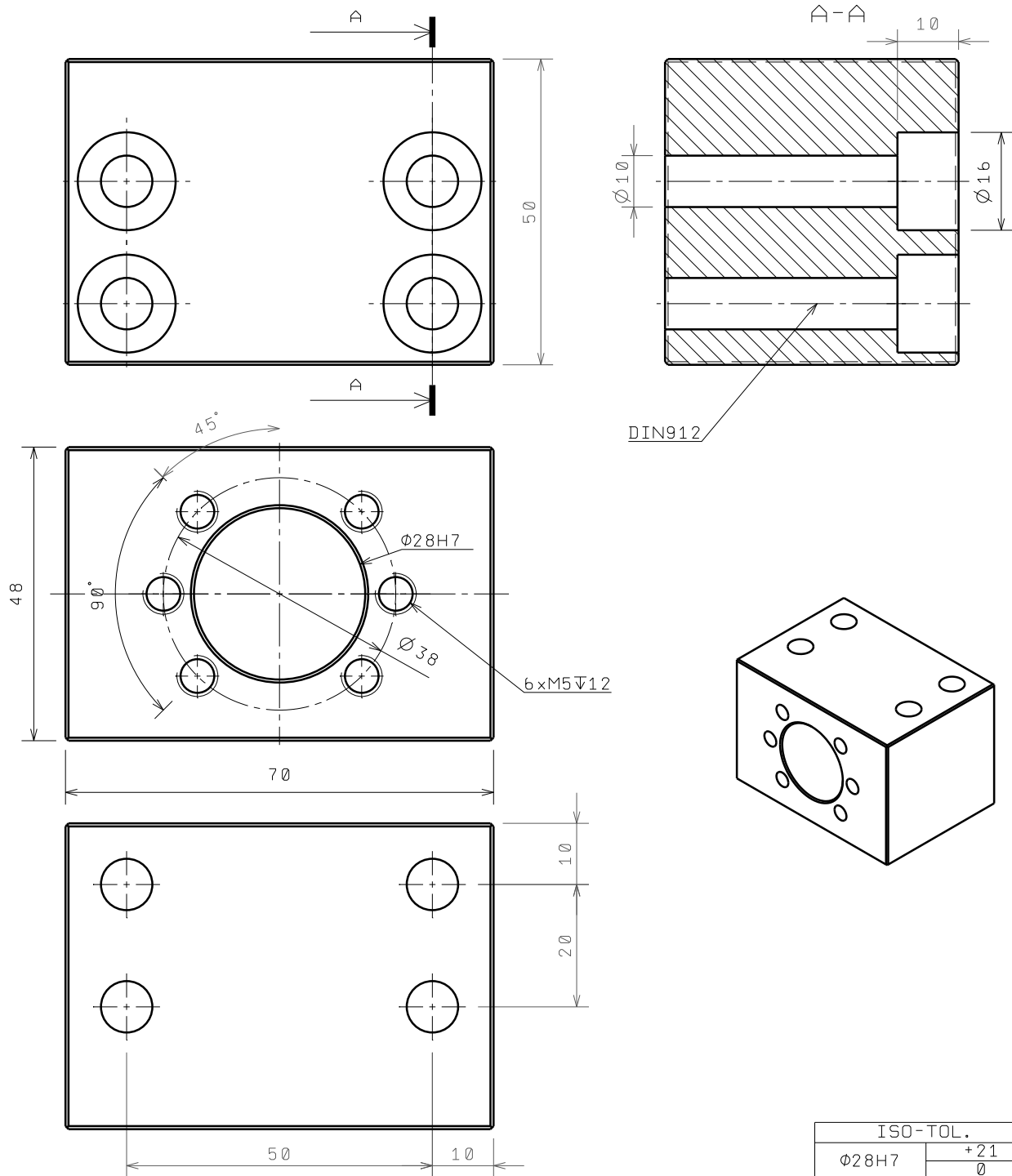
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao				
Razradio				
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa: 1,06kg		
 Mjerilo originala M 1:5	Naziv: KNV za X os		Pozicija: 7	Format: A4
	Crtež broj: 1-01-07			Listova: 1
				List: 1






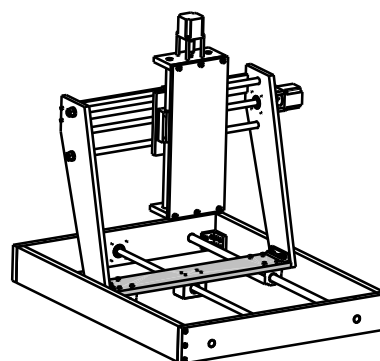
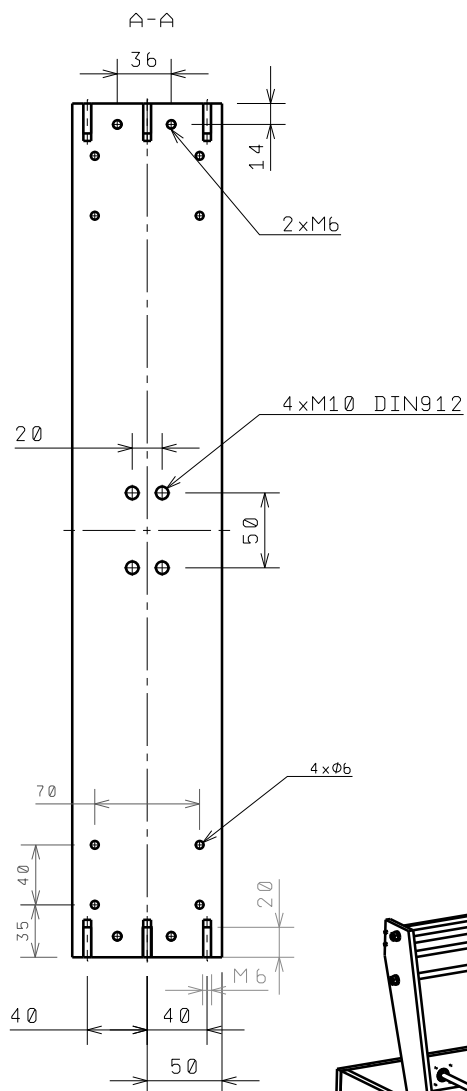
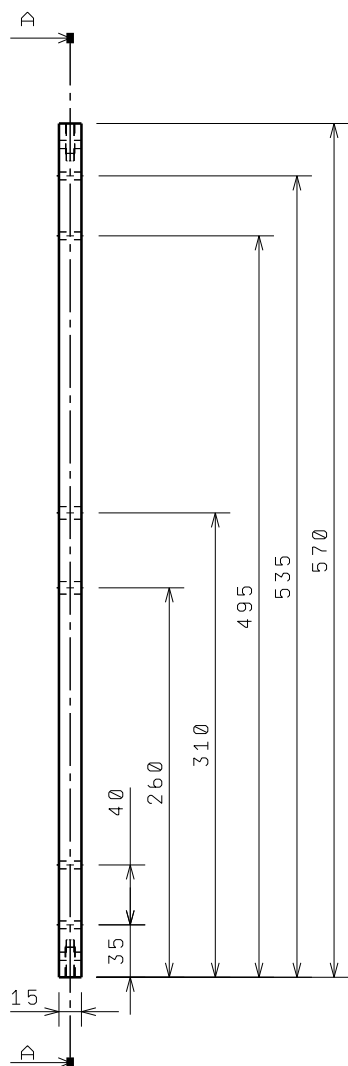
ISO-TOL.	
Ø28H7	+21 0



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao				
Razradio				
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt:				
DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				
Materijal:		Masa: 0,24kg		
 Mjerilo originala M 1:1	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	Matica za KNV		8	Listova: 1
	Crtež broj:		List: 1	
		1-01-08		

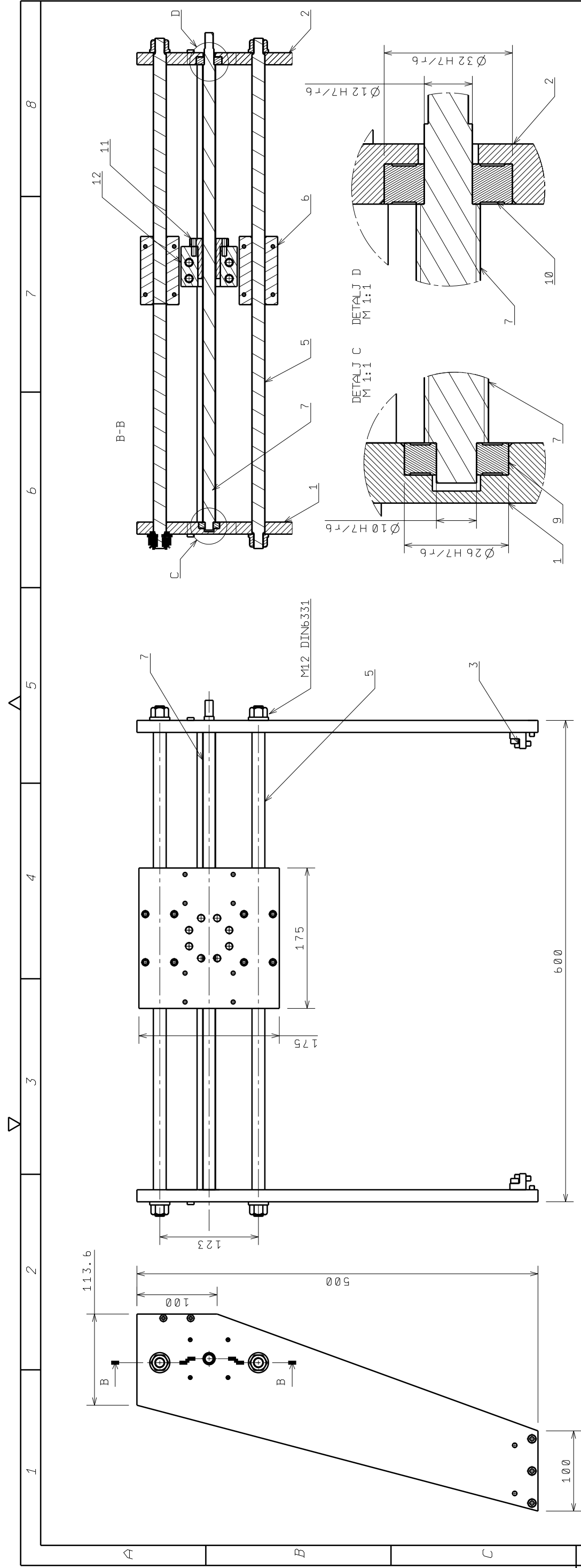




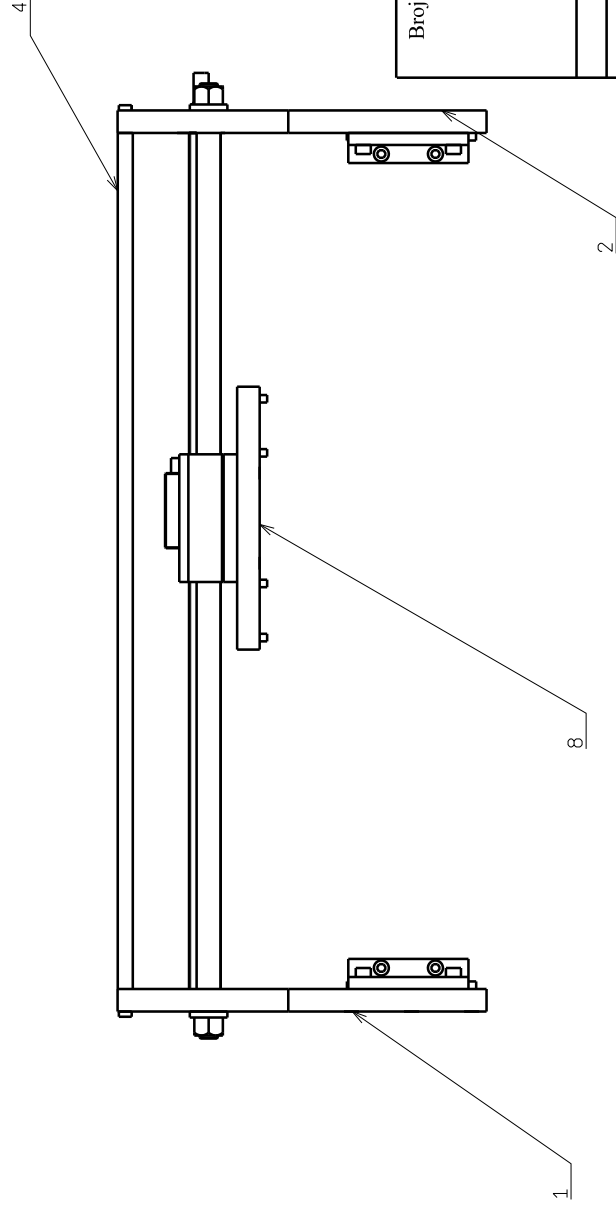
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec			
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec			
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec			
Pregledao					
Objekt:					
DIPLOMSKI RAD					
Napomena:					Kopija
Materijal: 1.0XXX		Masa: 1kg			
 	Naziv:		Pozicija:	Format: A4	
Mjerilo originala	Kućište matice vretena		9	Listova: 1	
	Crtež broj:		List: 1		
M 1:1	1-01-09				


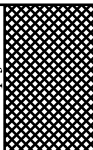
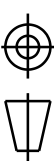


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				
Materijal: Al		Masa: 2,32kg		
	Naziv: Horizontalni nosač mosta		Pozicija: 10	Format: A4
Mjerilo originala M 1:5	Crtež broj: 1-01-10		Listova: 1	
			List: 1	



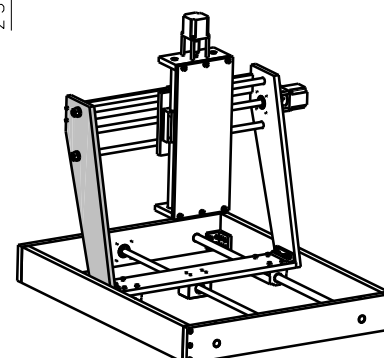
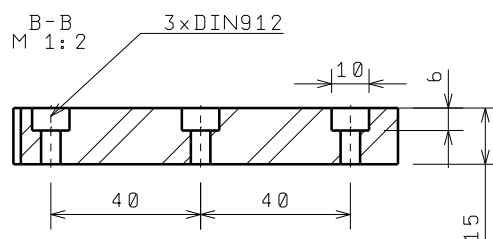
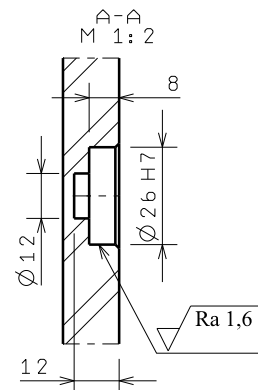
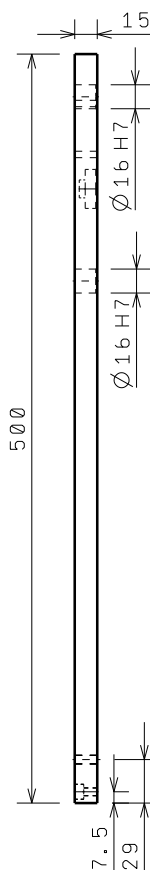
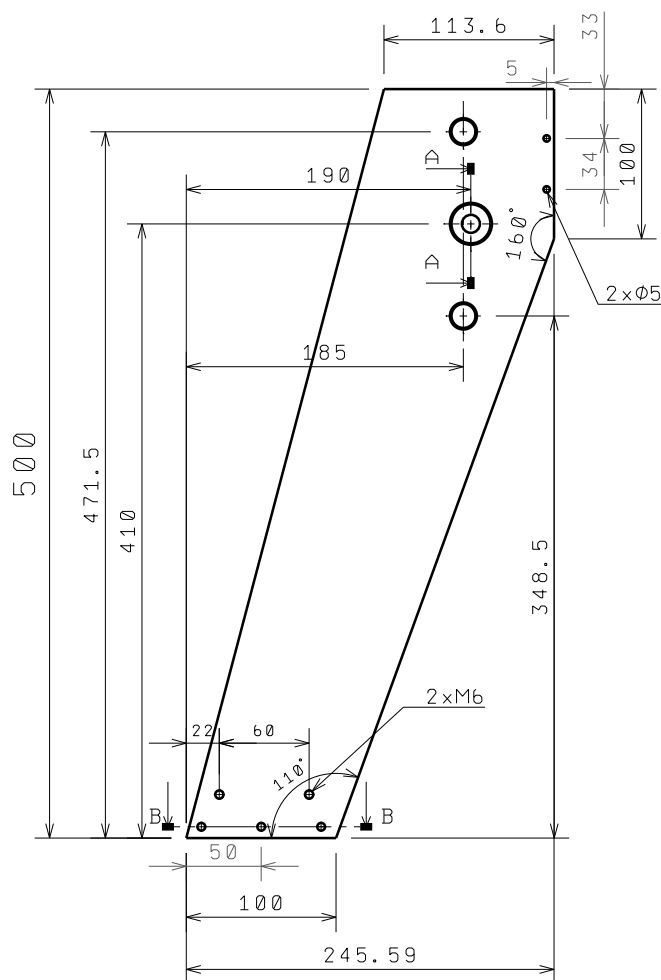
12	Kućište za maticu	1	1-01-09				1,1
11	Matica za SFU1605	1	1-01-08				0,3
10	Ležaj 6201-2Z	1				12/32/10	
9	Ležaj 6000-2Z	1				10/26/8	
8	Pluća po Y	1	1-02-08	Al	175x175x15	1,24	
7	KNV SFU1605 Y os	1	1-02-07		Ø16 L=620	0,7	
6	Linearni ležaj SCS161LUU	2	1-02-06		50x38,5x85	0,3	
5	Osovina po Y osi	2	1-02-05	1,20XX	Ø16 L=583	0,92	
4	Spoj vertikalna	1	1-02-04	Al	570x50x10	0,92	
3	L nosač za vertikalnu b=8	2	1-02-03	1,0XXX	20x20 L=80	0,15	
2	Vertikalni nosač - desno	1	1-02-02	Al	500x150x15	2,54	
1	Vertikalni nosač - lijevo	1	1-02-01	Al	500x150x15	2,54	
Poz.	Naziv	Kom	Crtež br.	Materijal	Dimenzije	Masa (kg)	




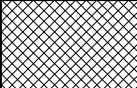


Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
	Projekтирао	4.1.2013.	Marko Klinec	
	Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec	
	Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec	
	Pregledao			
ISO - DOSJEDI		Objekt:		
φ10H7/г6		DIPLOMSKI RAD		
-4				
-28				
Napomena:				
-5				
-34				
Materijal:		Masa: 13kg		 Kopija
-7				
-41				
+6			Naziv:  Podsklop Y osi	Pozicija:
-28				
-9				
Mjerilo originala				
-50				
		1:5		
		Crtež broj: 1 - 02 - 00		
		List: 1		



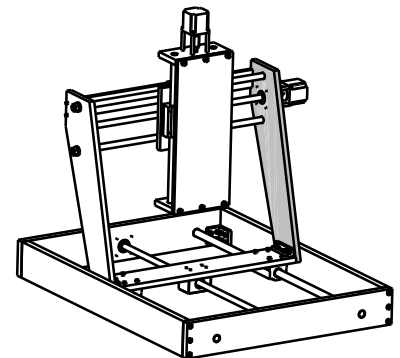
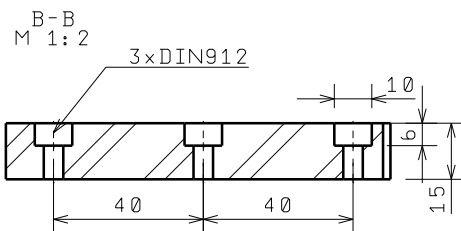
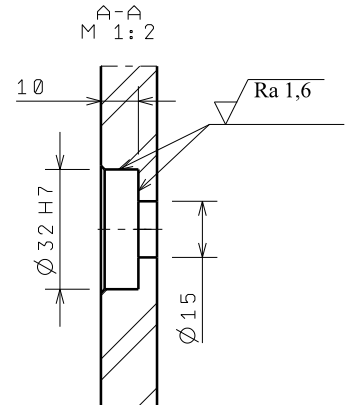
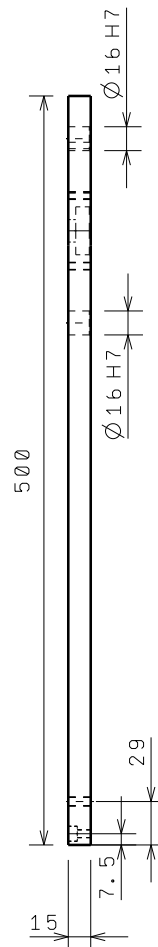
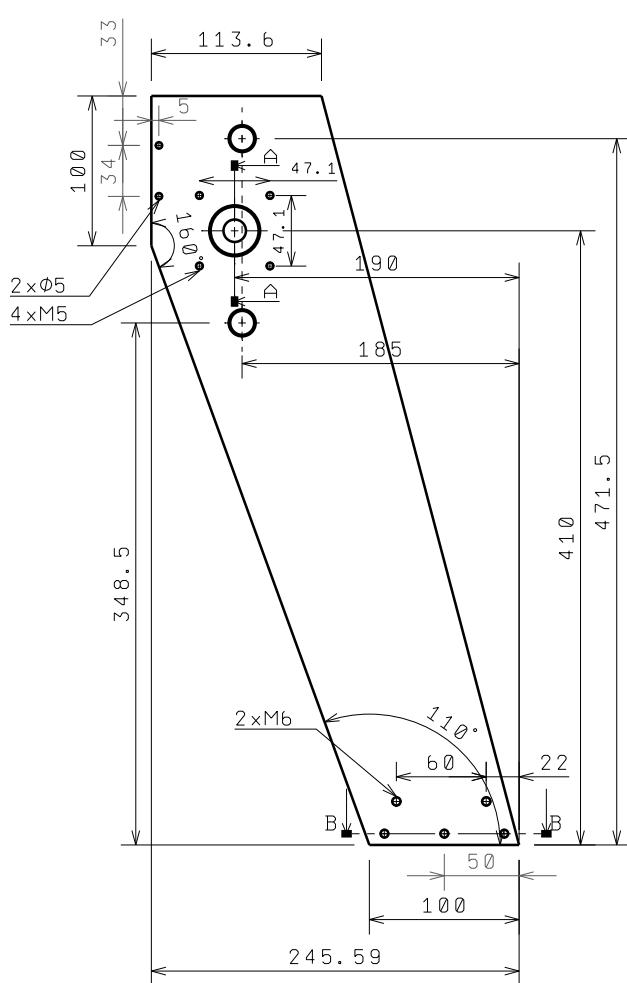
√ Ra 6,3 (√ Ra 1,6)



ISO-TOL.	
Ø16H7	+18 0
Ø26H7	+21 0



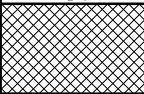
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt:			DIPLOMSKI RAD	
Napomena:				
Materijal: Al		Masa: 2,54kg		
 	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala	Vertikalni nosač lijevo		11	
M 1:5	Crtež broj:			List: 1
	1-02-01			

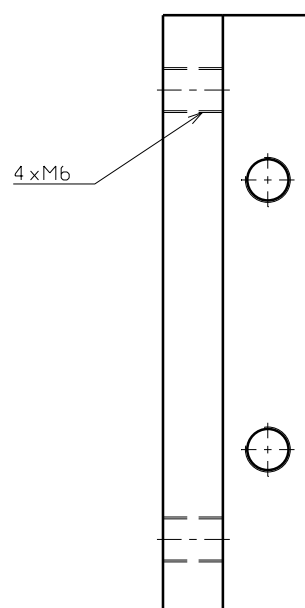
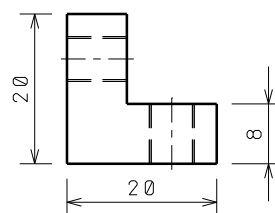
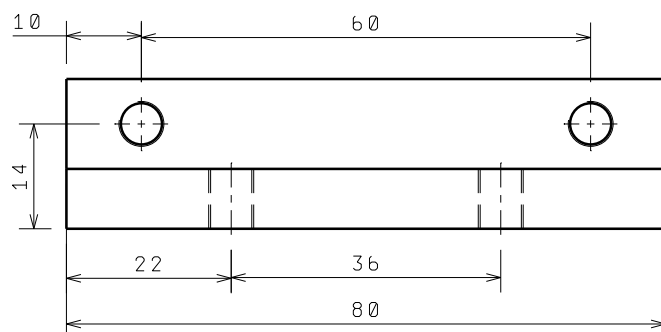
✓ Ra 6,3 (✓ Ra 1,6)


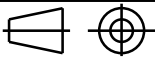


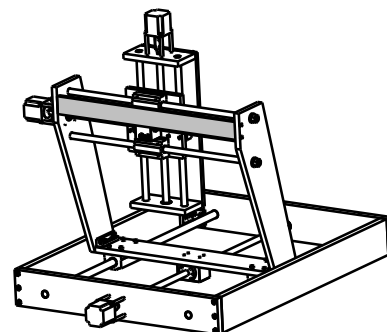
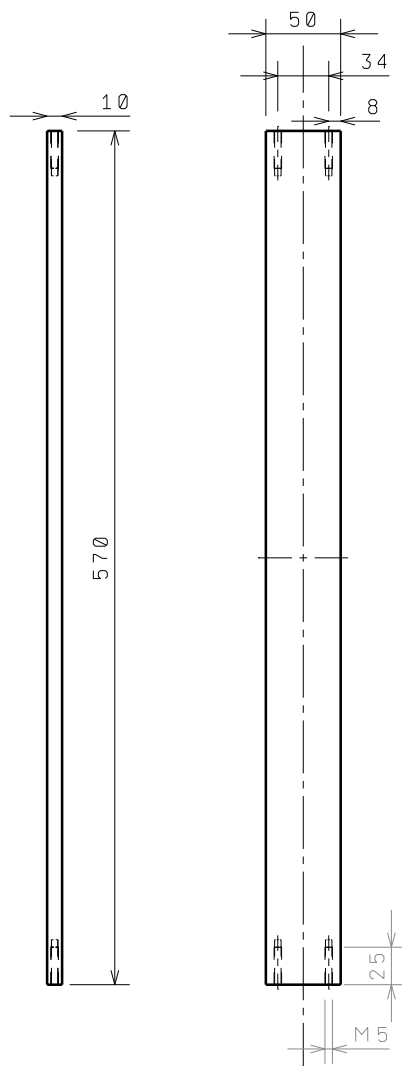
ISO-TOL.	
Ø16H7	+18 0
Ø32H7	+25 0


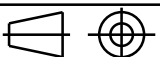
Design by CADLab

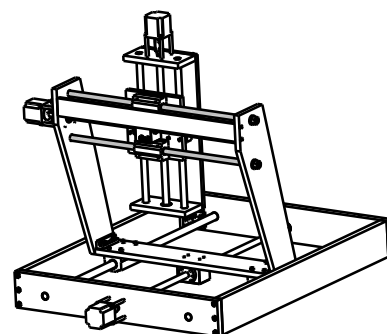
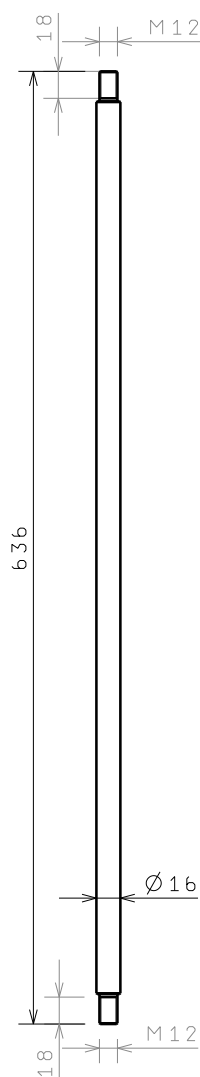
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec			
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec			
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec			
Pregledao					
Objekt:			DIPLOMSKI RAD		
Napomena:					
Materijal: Al		Masa: 2,54kg			
		Naziv:		Pozicija:	Kopija
		Vertikalni nosač desno		12	
Mjerilo originala					Format: A4
M 1:5					Listova: 1
		Crtež broj:			List: 1
		1-02-02			


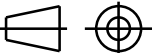


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt:				
DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal: 1.0XXX		Masa: 0,15kg		
 Mjerilo originala M 1:1	Naziv:		Pozicija:	Format: A4
	L nosač za vertikale		13	Listova: 1
	Crtež broj:		List: 1	
		1-02-03		

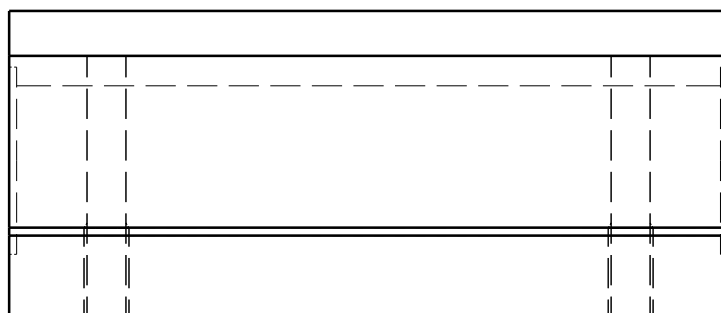
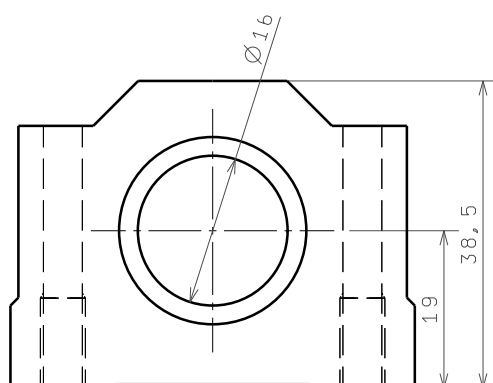
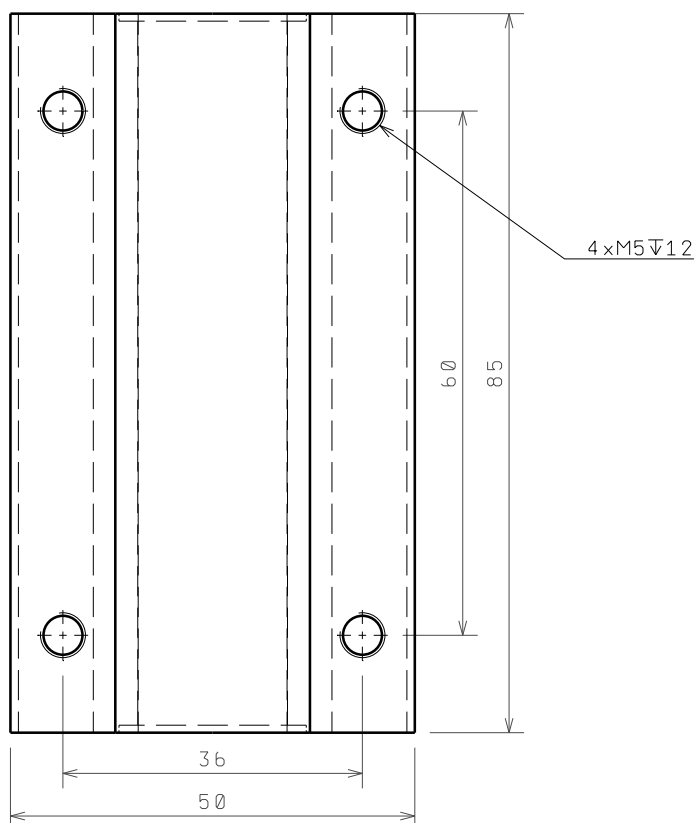





	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				
Materijal: Al		Masa: 0,92kg		
 Mjerilo originala M 1:5	Naziv: Spoj vertikala		Pozicija: 14	Kopija
				Format: A4
				Listova: 1
Crtež broj: 1-02-04			List: 1	

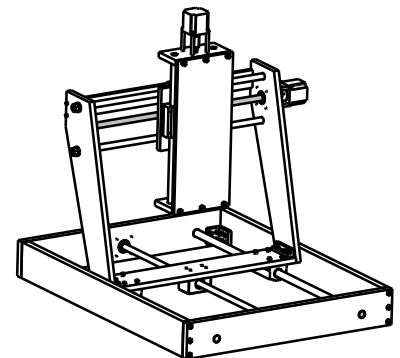
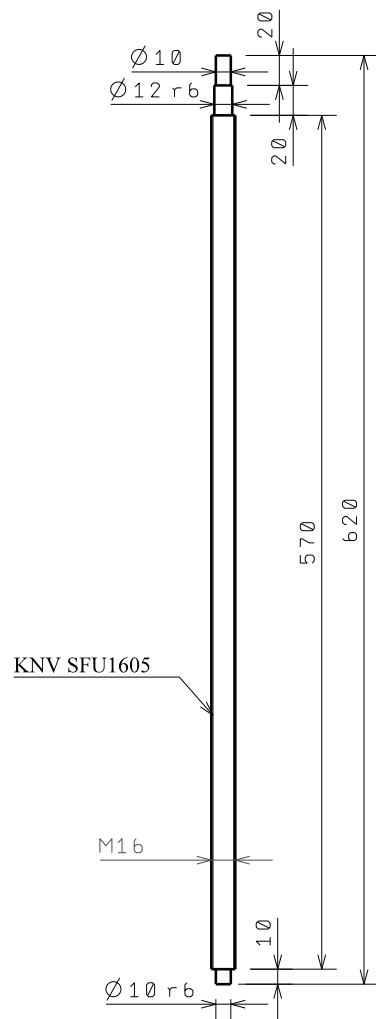


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				
Materijal: 1.20XX		Masa: 0,92kg		
	Naziv: Osovina za Y os		Pozicija: 15	Kopija
Mjerilo originala M 1:5	Crtež broj: 1-02-05		Format: A4	
			Listova: 1	
			List: 1	





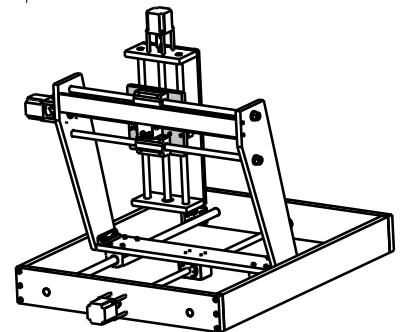


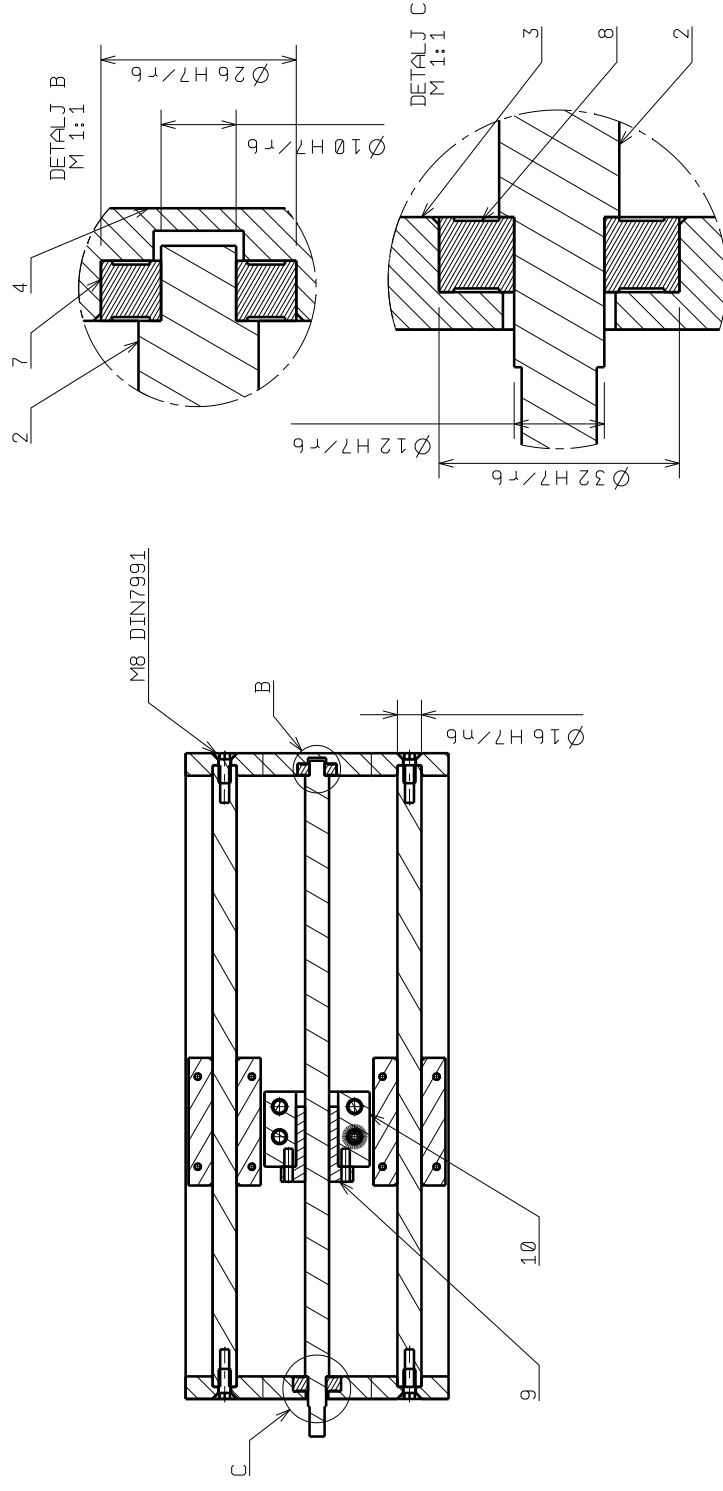
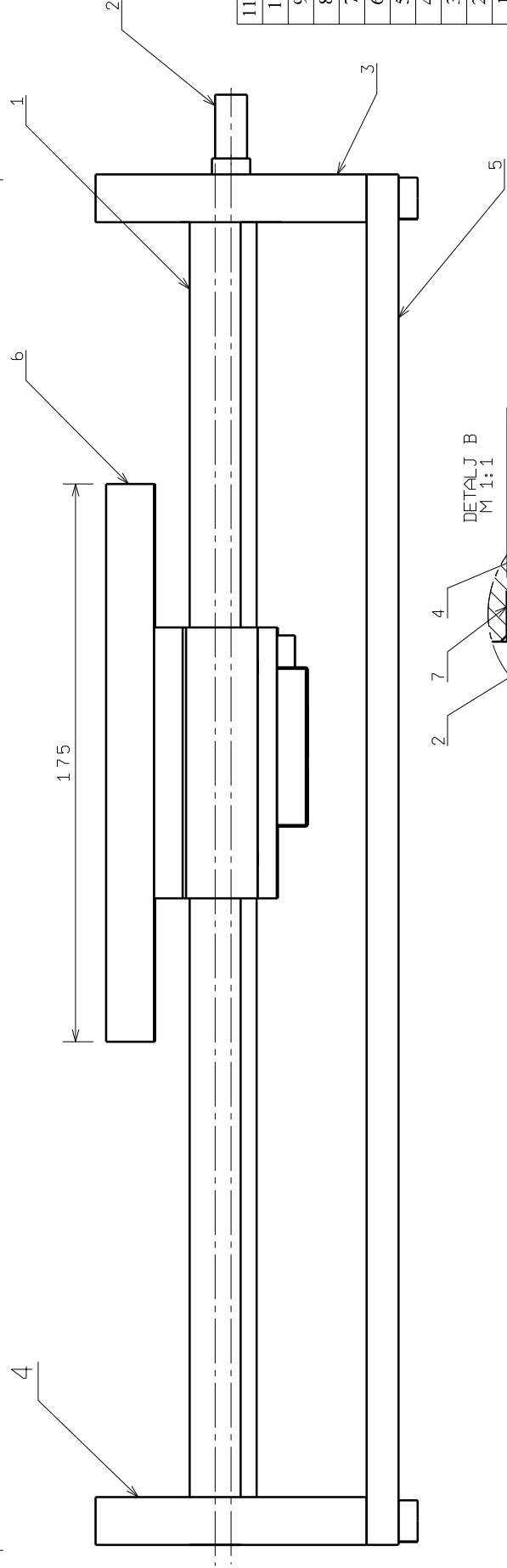
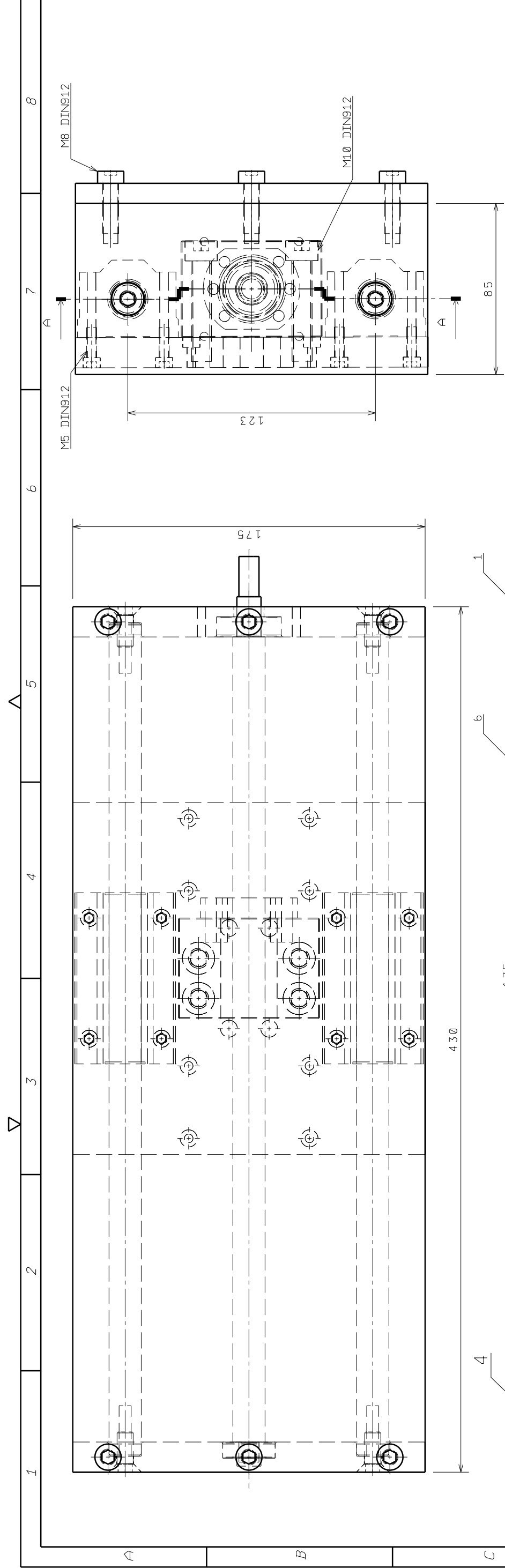
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				
Materijal:		Masa: 0,3kg		
 	Naziv: Linearni ležaj SCS16LUU		Pozicija: 16	<div>Kopija</div> <div></div>
Mjerilo originala M 1:1				Format: A4
	Crtež broj: 1-02-06			Listova: 1
				List: 1




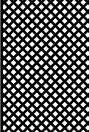
ISO-TOL.	
$\Phi 10r6$	+28
	+19
$\Phi 12r6$	+34
	+23

	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao				
Razradio				
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa: 0,7kg		
 Mjerilo originala M 1:5	Naziv: KNV za y os		Pozicija: 17	Format: A4
	Crtež broj: 1-02-07			Listova: 1
				List: 1

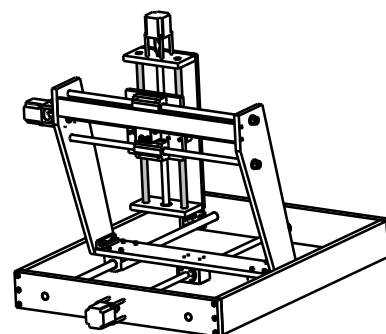
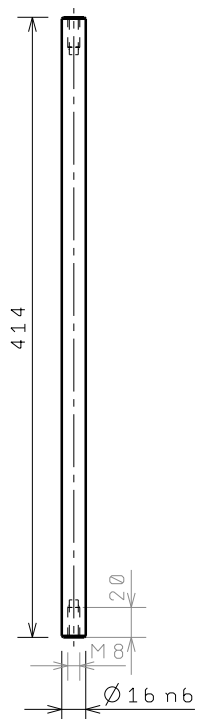






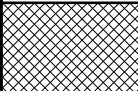
11	Linearni ležaj SCS16L1UU	2				50x38,5x85	0,3
10	Kučije za maticu	1	1-01-09		1,0XXX	70x50x48	1,1
9	Matica SFU1605	1	1-01-08			ø48 L=50	0,3
8	Ležaj 6201-2Z	1				12/32/10	
7	Ležaj 6000-2Z	1				10/26/8	
6	Ploča po Y	1	1-02-08		Al	175x175x15	1,24
5	Ploča po Z	1	1-00-23		Al	430x175x10	2
4	Ploča po Z - dolje	1	1-00-22		Al	175x85x15	0,6
3	Ploča po Z - gore	1	1-00-21		Al	175x85x15	0,6
2	KNV SFU1606 Z os	1	1-03-02			ø16 L=450	0,67
1	Osovina po Z	2	1-03-01		1,20XX	ø16 L=415	0,66
Poz.	Naziv	Kom	Crtež br.	Materijal	Dimenzije	Masa (kg)	

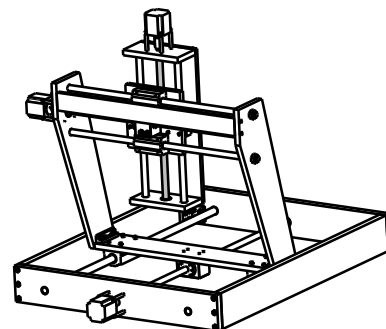
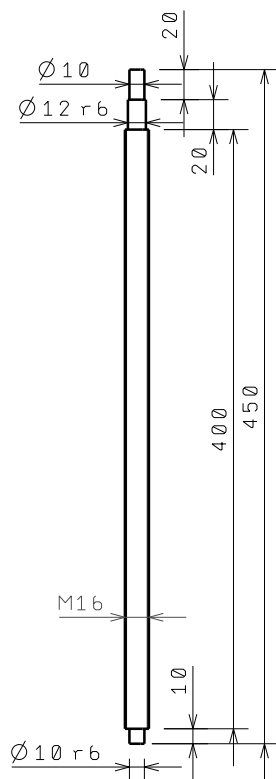
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao		4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio		4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao		4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao					
ISO - DOSJEDI		Objekt: DIPLOMSKI RAD			
Ø10H7/r6		Napomena:			Kopija
Ø12H7/r6		Materijal:			
Ø16H7/n6		Masa: 9kg			
Ø26H7/r6		Naziv: Podsklop Z osi			
Ø28H7/n6		Mjerilo originala			
Ø32H7/r6		1:2			
		Crtež broj: 1 - 03 - 00			List: 1







ISO-DOS.	
$\varnothing 16 \text{ H7/n6}$	$\begin{matrix} +6 \\ -23 \end{matrix}$

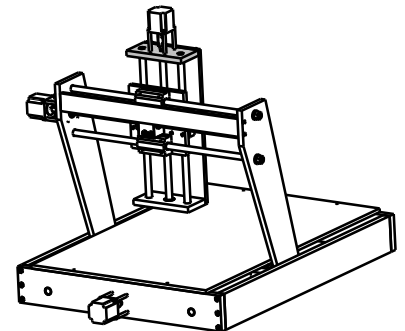
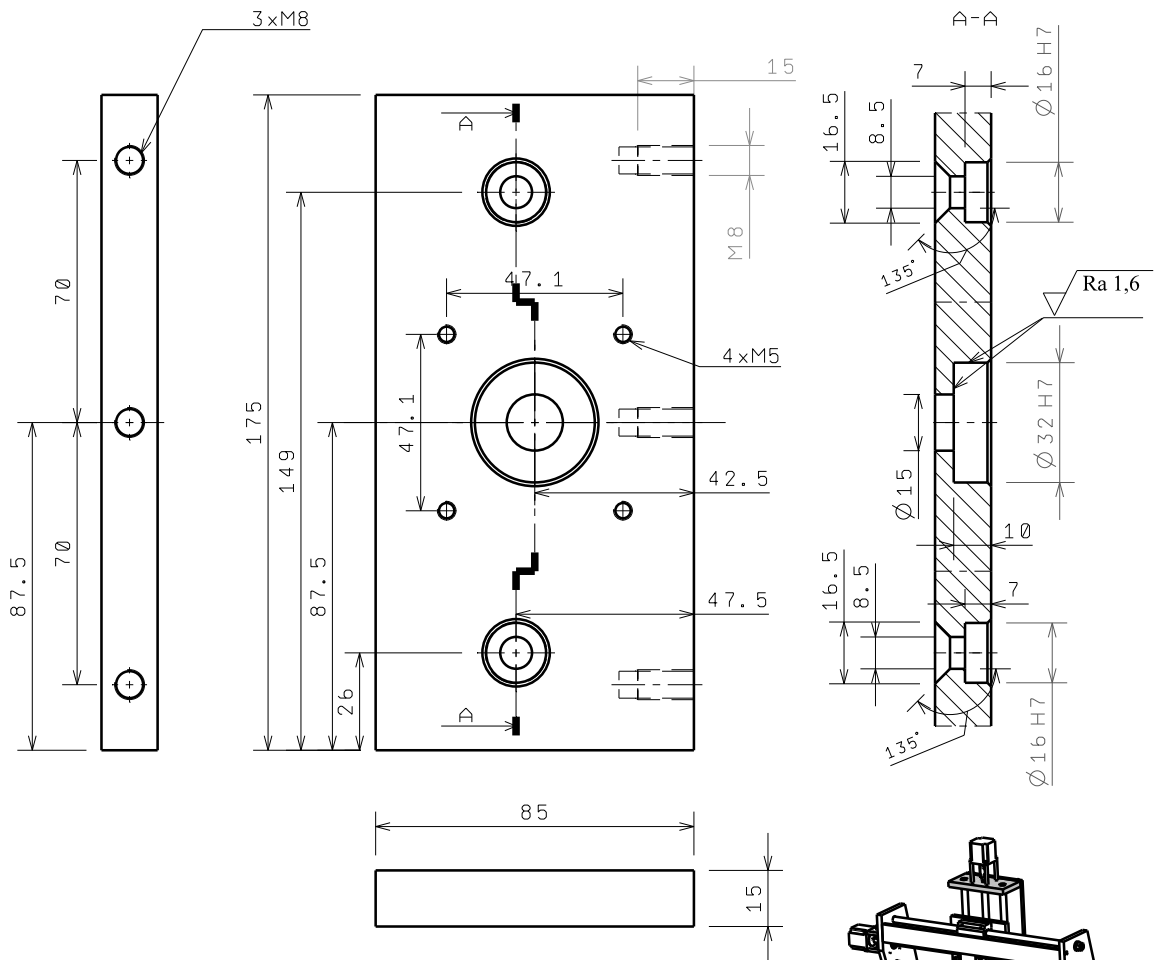
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				
Materijal: 1.20XX		Masa: 0,66kg		
		Naziv: Osovina za Z os	Pozicija: 19	Kopija 
Mjerilo originala M 1:5				Format: A4
				Listova: 1
		Crtež broj: 1-03-01		List: 1




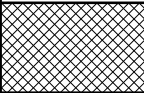

ISO-TOL.	
$\Phi 10 r6$	+28 +19
$\Phi 12 r6$	+34 +23

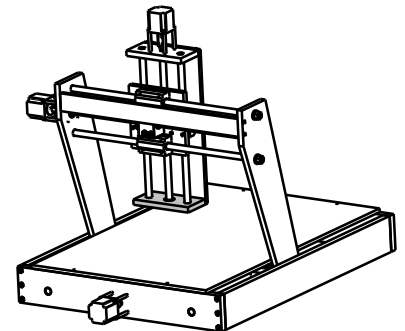
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao				
Razradio				
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal:		Masa: 0,43kg		
 Mjerilo originala M 1:5	Naziv: KNV za z os		Pozicija: 20	Format: A4
	Crtež broj: 1-03-02			Listova: 1
				List: 1

√ Ra 6,3 ( √ Ra 1,6 )






ISO-TOL.	
Ø 16 H7	+18 Ø
Ø 32 H7	+25 Ø

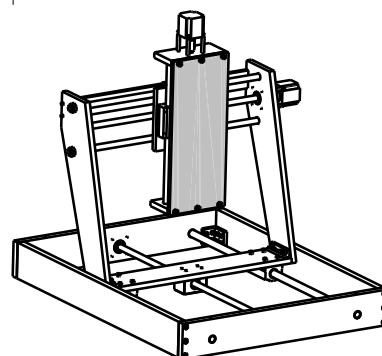
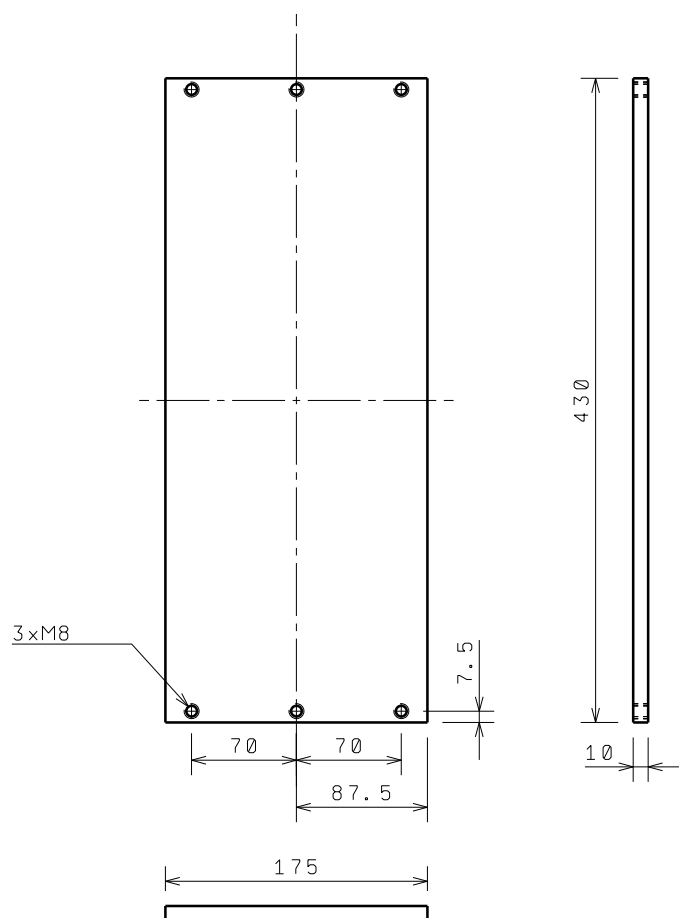
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec			
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec			
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec			
Pregledao					
Objekt:			DIPLOMSKI RAD		
Napomena:					Kopija
					
Materijal: Al		Masa: 0,6kg			
		Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala		Ploča po Z osi - gore		21	Listova: 1
		Crtež broj:			List: 1
M 1:2		1-03-03			


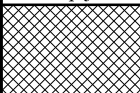

[illegible]

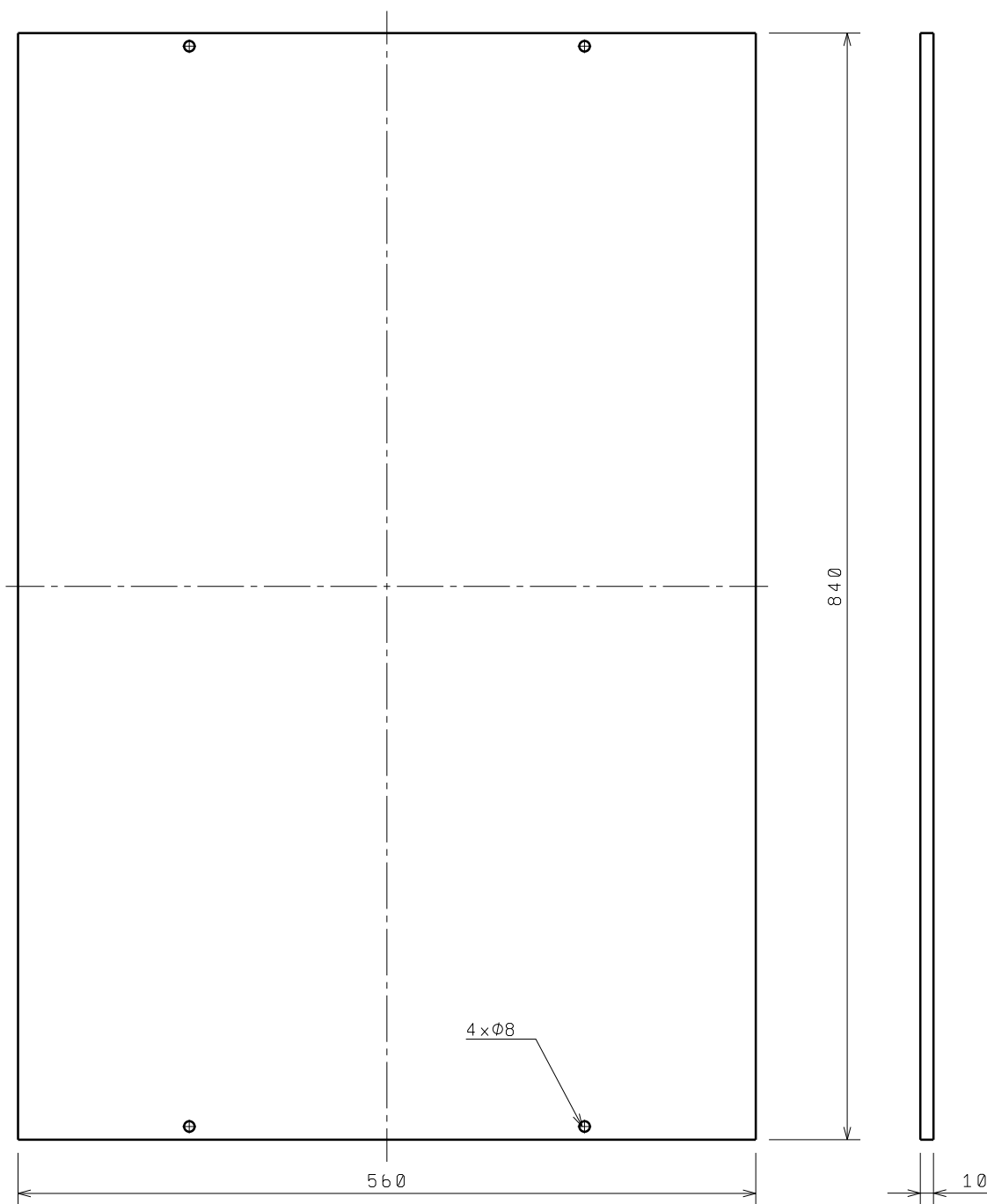
ISO-TOL.	
Ø16H7	+18
	0
Ø26H7	+21
	0




	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt:				
DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal: Al			Masa: 0,6kg	
 			Naziv:	Pozicija:
Mjerilo originala			Ploča po Z osi - dolje	22
M 1:2			Crtež broj:	
			1-03-04	

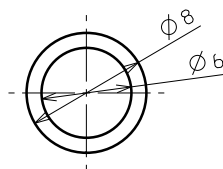
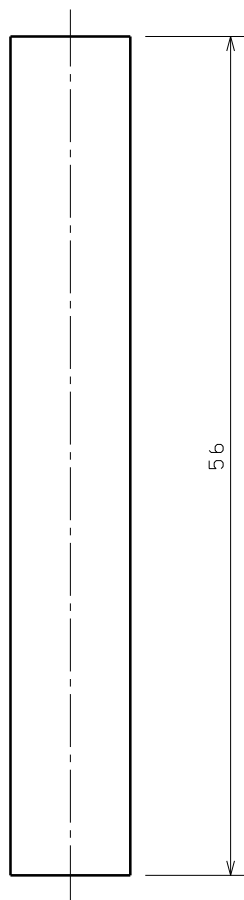



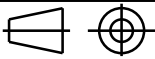


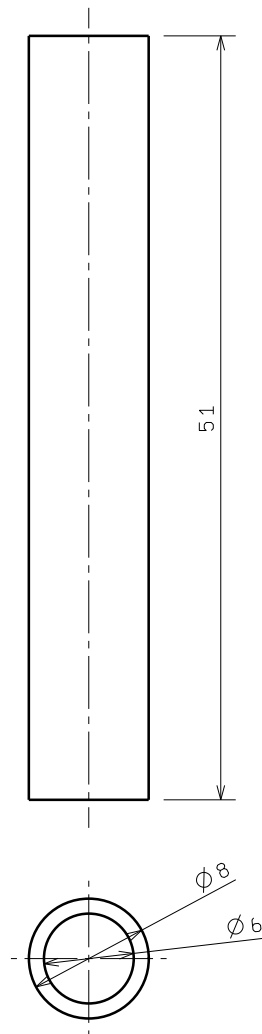
	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec			
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec			
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec			
Pregledao					
Objekt:					
DIPLOMSKI RAD					
Napomena:					
Materijal: Al		Masa: 2kg			
		Naziv:		Pozicija:	Format: A4
Mjerilo originala		Ploča po Z osi		23	
M 1:5		Crtež broj:			Listova: 1
		1-03-05			List: 1


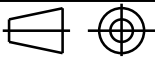


	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt:				
DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal:			Masa:	
 		Naziv:		Pozicija:
Mjerilo originala		Radna ploča		25
M 1:5		Crtež broj:		List: 1
		1-04-00		



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt:				
DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal: 1.0XXX		Masa: 0,1kg		
 Mjerilo originala M 2:1	Naziv:		Pozicija:	
	Graničnik za motor - dulji		26	
	Crtež broj:			
		1-05-00	List: 1	



	Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb
Projektirao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Razradio	4.1.2013.	Marko Klinec		
Crtao	4.1.2013.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Napomena:				Kopija
Materijal: 1.0XXX		Masa: 0,1kg		
	Naziv: Graničnik za motor - kraci		Pozicija: 27	Format: A4
Mjerilo originala M 2:1				Listova: 1
	Crtež broj: 1-06-00			List: 1

A

B

C

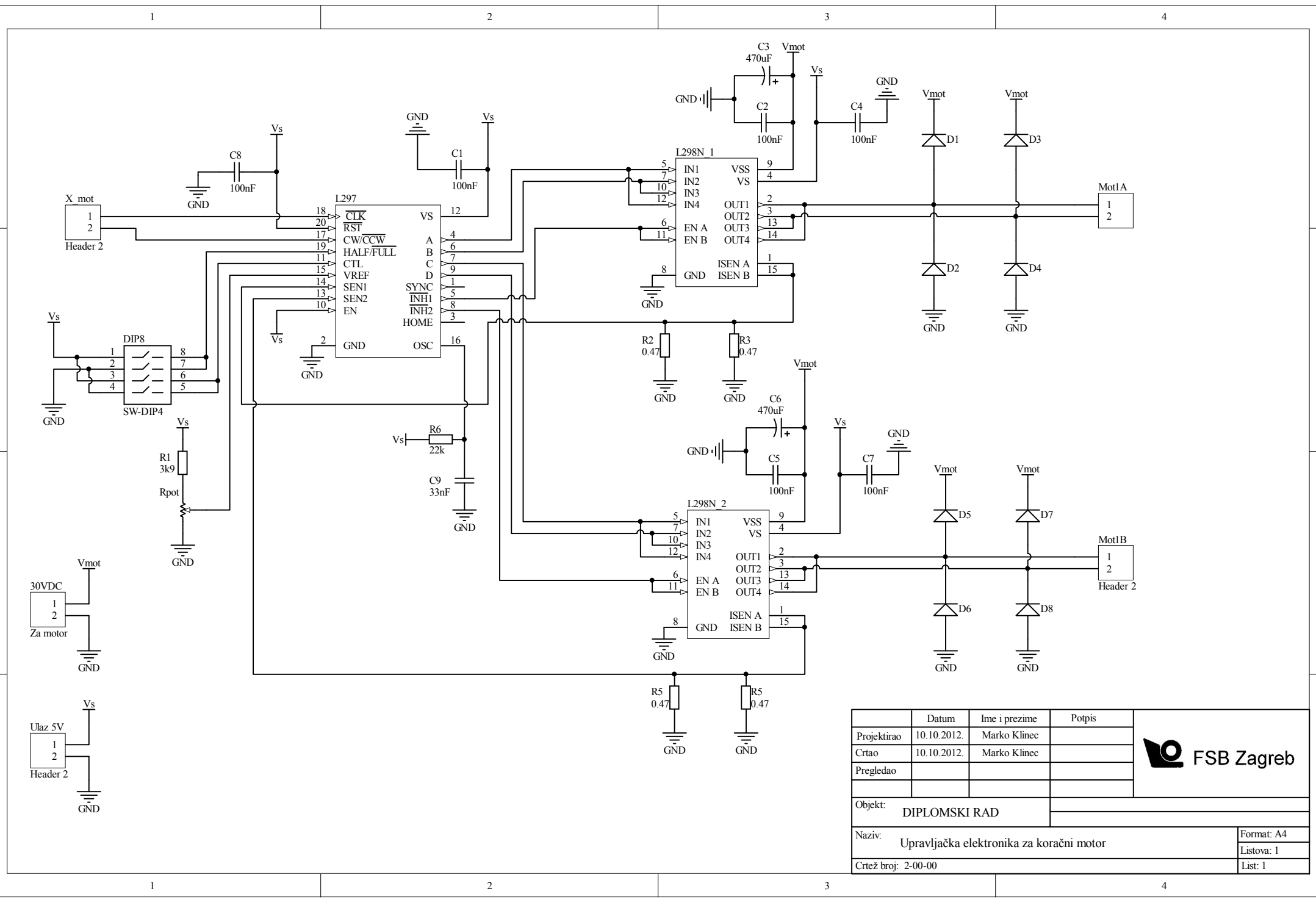
D


A

B

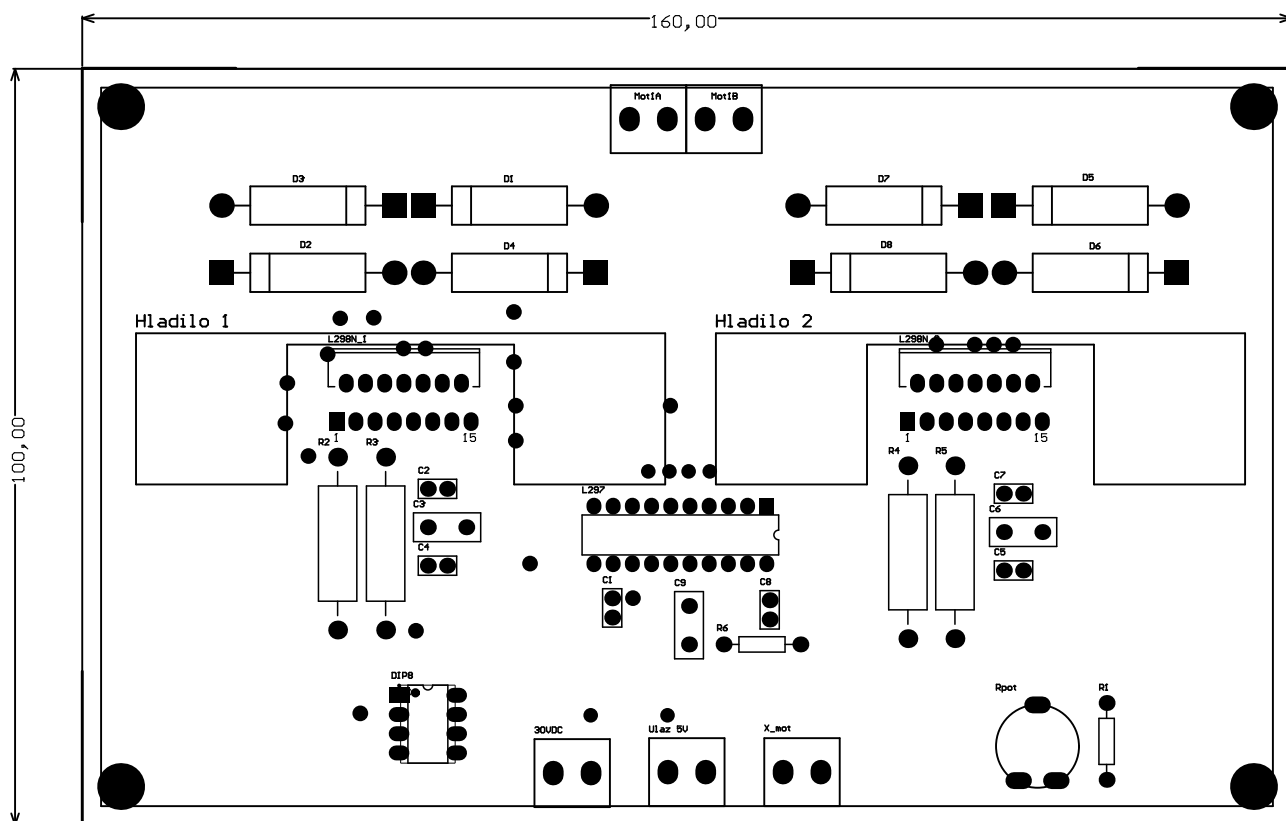
C

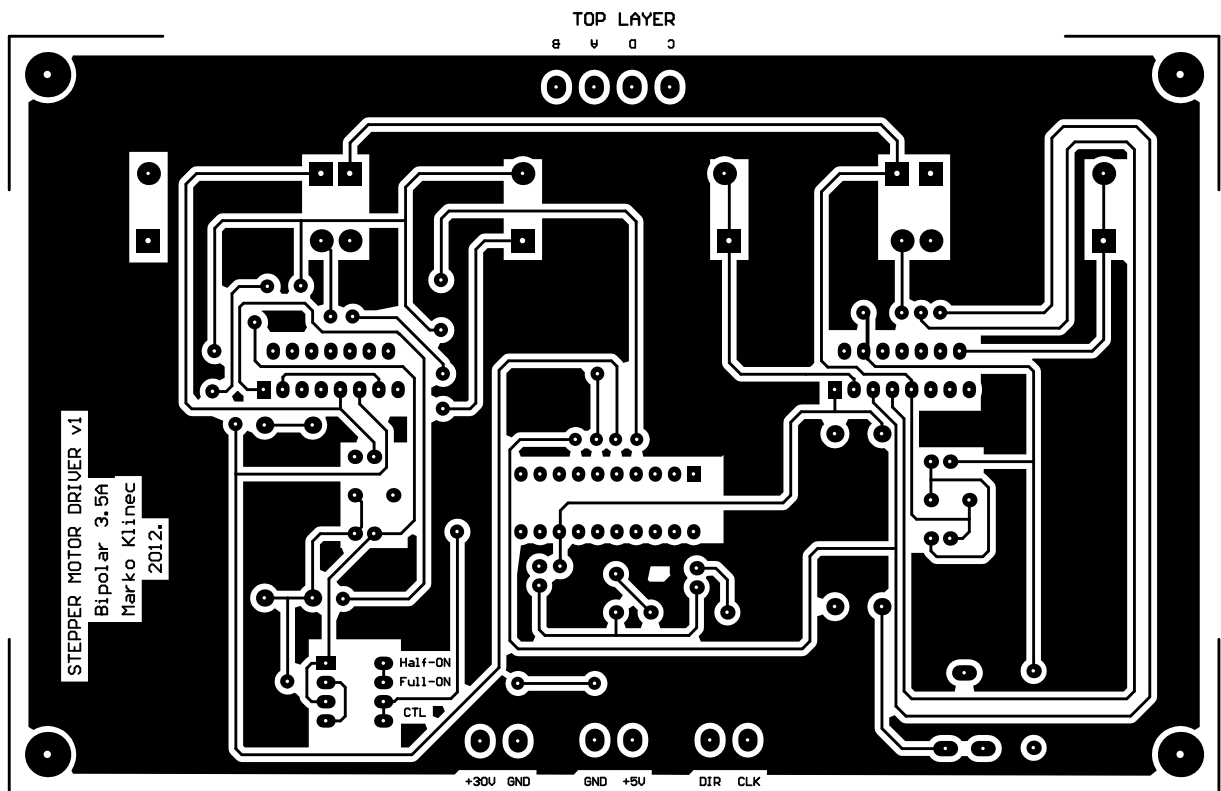
D



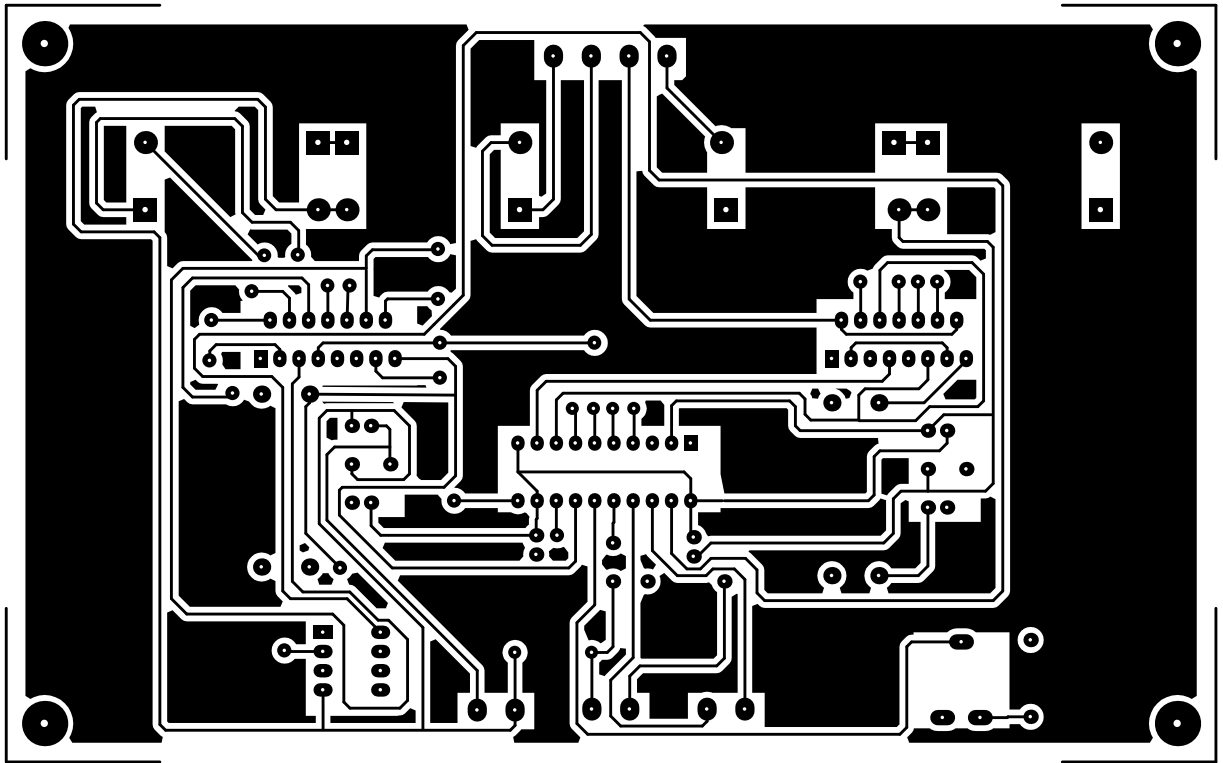
	Datum	Ime i prezime	Potpis	
Projektirao	10.10.2012.	Marko Klinec		
Crtao	10.10.2012.	Marko Klinec		
Pregledao				
Objekt: DIPLOMSKI RAD				
Naziv: Upravljačka elektronika za koračni motor				Format: A4
Crtež broj: 2-00-00				Listova: 1
				List: 1

## POLOZAJNI NACRT KOMPONENTI





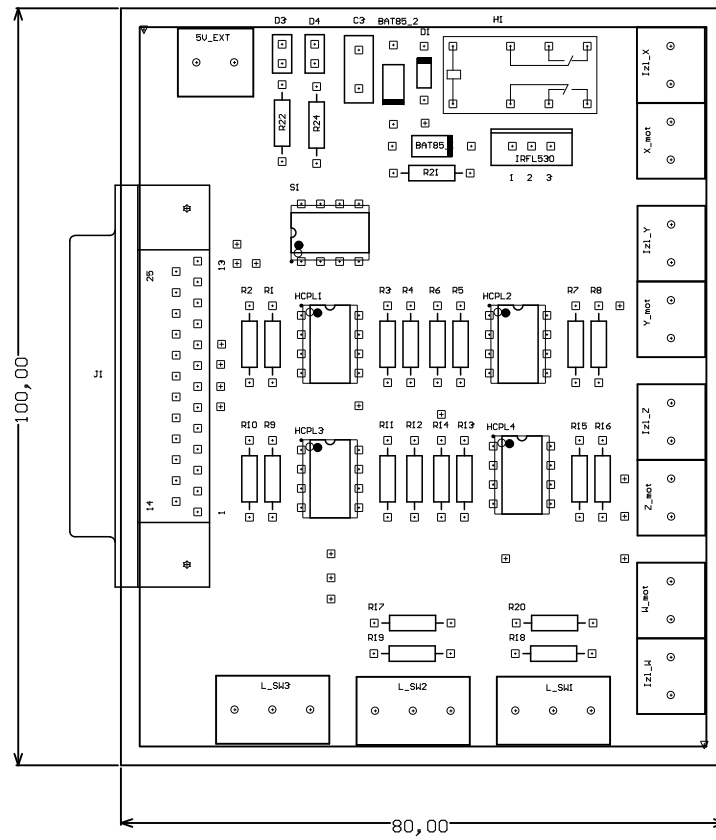
BOTTOM LAYER



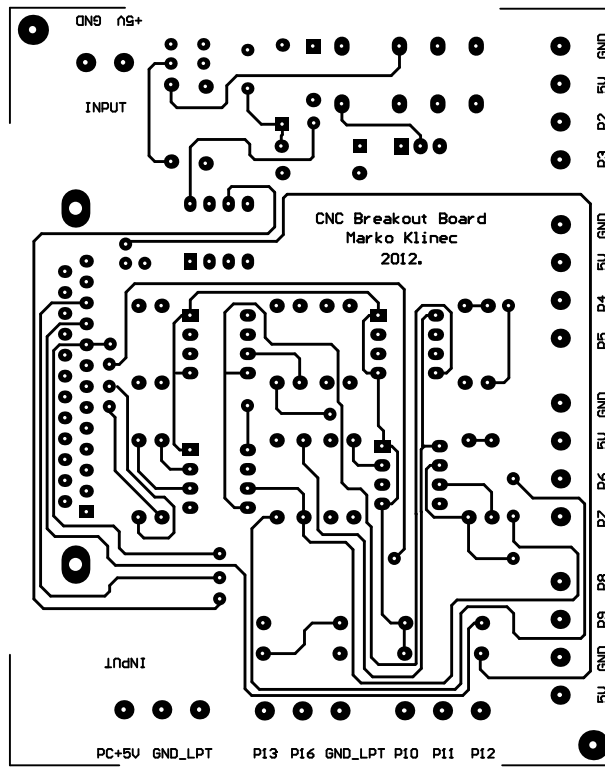




# POLOZAJNI NACRT KOMPONENTI



# TOP LAYER



BOTTOM LAYER

